

Respuesta fisiológica del frijol caupi *Vigna unguiculata* L., utilizado como abono verde en cultivo asociado con caña de azúcar *Saccharum officinarum* L., en suelos *Pachic Haplustolls* del municipio El Cerrito- Valle del Cauca.

Walter Gómez Gómez
John Fernando Gutiérrez Ramírez

Universidad Nacional Abierta y a distancia
Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y de Medio Ambiente
Programa Agronomía
Palmira
2015

Respuesta fisiológica del frijol caupi *Vigna unguiculata* L., utilizado como abono verde en cultivo asociado con caña de azúcar *Saccharum officinarum* L., en suelos *Pachic Haplustolls* del municipio El Cerrito- Valle del Cauca.

Walter Gómez Gómez
John Fernando Gutiérrez Ramírez

Trabajo de grado para optar al título de Agrónomo

Director:
Oscar Sanclemente. I.A.PhD

Universidad Nacional Abierta y a distancia
Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y de Medio Ambiente
Programa Agronomía
Palmira
2015

Dedicatoria

John Fernando

A Dios por ser mi guía y mi fortaleza,
A mis padres,
A mis hijas por ser la razón de mi vida.

Agradecimientos

Al Doctor Oscar Sanclemente por sus orientaciones.

A todas y cada una de las personas y Entidades que hicieron posible el desarrollo de éste trabajo.

Contenido

INTRODUCCION	xii
1. OBJETIVOS	4
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.2 OBJETIVO ESPECIFICO.....	4
2. MARCO TEORICO	5
2.1. ANTECEDENTES	5
2.2 REQUERIMIENTO DE SUELO DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZUCAR.....	7
2.3 FISIOLOGIA DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZUCAR	8
2.4 SUBPRODUCTOS DE LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA COMO FUENTE DE NUTRIMENTOS.....	10
2.4.1 Cachaza.....	10
2.4.2 Compost y cenichaza.	12
2.4.3. El compostaje	13
2.4.4. La Vinaza.....	14
2.5 FRIJOL CAUPI <i>Vigna unguiculata</i> L.....	15
2.5.1. Uso del frijol Caupi como Abono verde en sistemas de cultivo	17
2.6 EL NITROGENO COMO ELEMENTO FUNDAMENTAL EN EL DESARROLLO DE LAS PLANTAS	19
2.6.1 Ciclo del Nitrógeno en la naturaleza	20
2.6.2 Fijación biológica de nitrógeno (FBN).....	22
2.7 MICROORGANISMOS DIAZOTROFICOS	24
2.7.1 Microorganismos Diazotróficos Asimbióticos	24
2.7.2 Microorganismos diazotróficos simbióticos.....	24
2.7.2.1 Género Rhizobium sp.....	25
2.8 IMPORTANCIA DE LA FIJACION BIOLOGICA DE NITROGENO (FBN) EN LEGUMINOSAS	27
3. METODOLOGÍA.....	29
3.1 LOCALIZACION	29
3.2 SUELO	29

3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	30
3.4 ESTABLECIMIENTO DE LAS PARCELAS.....	32
3.5 TOMA DE MUESTRAS DE SUELO	32
3.6 EVALUACION DE LA CAPACIDAD DE PROMOCION DE CRECIMIENTO VEGETAL.....	33
3.6.1 Germinación.....	33
3.6.2 Longitud y biomasa.....	33
3.7 ESTIMACION DE N	34
3.8 ANALISIS DE LOS RESULTADOS.....	35
4 RESULTADOS Y DISCUSION	36
4.1 VARIABLES DE RESPUESTA	36
4.1.1 Nitrógeno Inorgánico.....	36
4.1.2 Humedad del suelo	39
4.1.3 Crecimiento vegetal	40
5 CONCLUSIONES.....	52
6. BIBLIOGRAFIA.....	¡Error! Marcador no definido.
ANEXOS.....	57

Lista de Figuras

Figura 1. Relaciones entre el ciclo del nitrógeno y los compartimentos orgánicos y minerales.	22
Figura 2. Descripción de tratamientos en campo.	31
Figura 3. Aporte de N total en el suelo	37
Figura 4. Cantidad de N-NO ₃ en cuartiles.	38
Figura 5. Distribución cantidad de humedad (%)	39
Figura 6. Lámina de agua en m ³	40
Figura 7. Porcentaje promedio de germinación en los tratamientos evaluados y prueba DMS (5%).....	42
Figura 8. Altura de planta promedio y prueba DMS (5%) en los tratamientos evaluados	42
Figura 9. Promedio de PSP y prueba de comparación DMS al 5% en los tratamientos evaluados	44
Figura 10. Promedio de PP y prueba de comparación DMS al 5% en los tratamientos evaluados	45
Figura 11. Interacción número de plantas y tratamientos y días de evaluación	47
Figura 12. Peso de nódulos y días de evaluación	48
Figura 13. Interacción PPN entre los tratamientos y días de evaluación	49
Figura 14. Tamaño de nódulos entre los tratamientos y días de evaluación	50

Lista de Tablas

Tabla 1. Descripción de los periodos de muestreo.....	34
Tabla 2. Contenido de Nitrógeno en el suelo	36

Lista de Anexos

Anexo 1. Distribución de parcelas en campo suerte 201 D Finca El Alizal	57
Anexo 2. Características químicas enmienda orgánica vinaza y compost.....	58
Anexo 3. Tabla comparativa N inorgánico tratamiento vs testigo	59
Anexo 4. Análisis descriptivo conjunto de datos disponibilidad de N en suelo	59
Anexo 5. Análisis descriptivo conjunto de datos % humedad del suelo.....	60
Anexo 6. Prueba de comparación de medias DMS al 5% para las variables	61
Anexo 7. Cuadrados medios del ANOVA.....	61
Anexo 8. Valor p del análisis de varianza de medidas repetidas en el tiempo para la comparación de variables de planta en cuatro tiempos de evaluación	61
Anexo 9. Prueba de comparación de medias de mínimos cuadrados entre tratamientos.....	62
Anexo 10. Prueba de comparación de medias de mínimos cuadrados entre tiempos de evaluación.....	62
Anexo 11. Promedio del número de plantas por tratamiento y tiempo de evaluación	63
Anexo 12. Promedio de PEN por tratamiento y tiempo de evaluación.....	63
Anexo 13. Promedio de PPN por tratamiento y tiempo de evaluación.....	64
Anexo 14. Promedio de TN por tratamiento y tiempo de evaluación.....	64

Resumen

La fertilización nitrogenada convencional en el cultivo de caña de azúcar *Saccharum officinarum* L., incluye el uso de moléculas de síntesis química derivadas del petróleo altamente solubles como la urea, lo que genera altos costos e impactos ambientales como la contaminación del recurso hídrico y la emisión de gases de efecto invernadero GEI. Gracias a la fijación simbiótica de N₂ con rizobios del suelo, las leguminosas forrajeras tropicales utilizadas como abono verde AV, representan una alternativa viable de fertilización en este cultivo. El presente estudio se desarrolló en la hacienda El Alizal suerte 201D, ubicada 76°19'43"W, 3°37'19"N en el municipio de El Cerrito- Valle del Cauca, y tuvo como objetivo evaluar la respuesta fisiológica del frijol caupi *Vigna unguiculata* asociado a cultivos orgánicos de caña de azúcar y evidenciar su efectividad en el aporte nitrogenado del suelo al ser usado como abono verde junto a diferentes tipos de enmiendas orgánicas. En diseño de bloques completos al azar y cuatro repeticiones, se usaron los siguientes tratamientos: (T1) *Rhizobium* sp. en dosis comercial + 6000 l/ ha de vinaza, (T2) 6000 l/ ha de vinaza (T3) *Rhizobium* sp. en dosis comercial + 10 ton/ha de compost, (T4) 10 ton/ha de compost, (T5) *Rhizobium* sp. en dosis comercial + 6000 l/ ha de vinaza + 10 ton/ha de compost, (T6) 6000 l/ ha de vinaza + 10 ton/ha de compost, (T7) *Rhizobium* sp. en dosis comercial, (T8) Fríjol caupi y (T9) Control . A los 52 días después de la siembra DDS, se evaluó la materia seca foliar del Caupí por método del cuadrante, el número y tamaño de los nódulos, la concentración de nitratos y amonio en el suelo por espectrofotometría. No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos.

Estos resultados indican que el uso de abono verde fríjol caupi (*Vigna unguiculata* L.) posibilitan la sustitución de insumos de síntesis química industrial en el cultivo de caña de azúcar convirtiéndose en una alternativa más sustentable.

PALABRAS CLAVE: fríjol caupi (*Vigna unguiculata* L.), caña de azúcar (*saccharum officinarum*), leguminosas forrajeras del trópico.

Abstract

The conventional nitrogen fertilization in the cultivation of sugarcane *Saccharum officinarum* L., includes the use of chemically synthesized molecules derived from highly soluble oil as urea, which it generates high costs and environmental impacts such as pollution of water resources and the emission of greenhouse gases. Thanks to the symbiotic fixation N₂ with soil rhizobia tropical legumes used as green manure GM, they represent a viable alternative in this crop fertilization. This research was developed in El Alizal ranch plot 201D, located 76°19'43"W, 3°37'19"N in the El Cerrito- Valle del Cauca, the purpose of this work was to evaluate the physiological response caupi bean *Vigna unguiculata* associated with organic sugar cane crops and demonstrate its effectiveness in the contribution nitrogen to the soil when it used as green manure with different kind of organic amendments. A complex bloc design was used randomly with nine treatments and four repetitions: (T1) *Rhizobium sp.* commercial dose + 6000 l/ ha vinaza, (T2) 6000 l/ ha vinaza (T3) *Rhizobium sp.* commercial dose + 10 ton/ha de compost, (T4) 10 ton/ha de compost, (T5) *Rhizobium sp.* commercial dose + 6000 l/ ha de vinaza + 10 ton/ha de compost, (T6) 6000 l/ ha de vinaza + 10 ton/ha de compost, (T7) *Rhizobium sp.* commercial dose, (T8) caupi bean y (T9) Witness. At 52 days after planting it was evaluated dry matter leaf caupi bean by quadrant method, the number and size of nodules, nitrates and ammonium concentration in soil by spectrophotometry. In this study there was no significant difference between treatments.

These results indicate that use of green manure caupi bean (*Vigna unguiculata* L.) it allows substitution agricultural of resource chemical synthesis in growing sugar cane into a more sustainable alternative.

Keywords: caupi bean (*Vigna unguiculata* L.), sugarcane *Saccharum officinarum* L., tropical legumes

Introducción

El Ingenio Providencia S.A. es una empresa del sector Agroindustrial perteneciente a la OAL, ubicado a 36 Km del municipio de Santiago de Cali, en la ruta que conduce al norte del Valle del Cauca (Colombia). Se dedica principalmente a la producción de azúcar y otros derivados como el alcohol carburante y la generación de energía a partir de fuentes secundarias como el bagazo de caña de azúcar. En la actualidad, el ingenio cuenta con 25 mil has sembradas en caña de azúcar y muele aproximadamente 3 millones de t/año, lo que representa una producción anual efectiva de 310 mil t de azúcar y 93 millones L/año de alcohol carburante.

En el año 1999 atendiendo los nuevos requerimientos del mercado, el Ingenio Providencia S.A. realizó la primera producción comercial de azúcar orgánica, convirtiéndose en un abanderado en Colombia. Para la producción de azúcar orgánica se requiere de un manejo integral de la unidad productiva, que consiste en la implementación de prácticas de conservación de suelos, el mejoramiento de las condiciones ecológicas del cultivo como la siembra de especies nativas de barrera, la optimización del uso de agua de riego, la aplicación de abonos orgánicos y, el control manual de arvenses. Todas las labores de siembra y las labores culturales se llevan a cabo cumpliendo todos los requisitos establecidos por las entidades certificadoras, convirtiéndose en un asunto organizacional con enfoque empresarial-ecológico.

El Ingenio en su compromiso con el ambiente ha implementado estrategias no convencionales para la nutrición vegetal como el compost y subproductos de destilería como la vinaza. Estos productos al ser sometidos al análisis

químico presentan bajas concentraciones de elementos mayores, sobre todo de nitrógeno elemento esencial que más limita el desarrollo y determina el comportamiento productivo de las plantas afectando el rendimiento agroindustrial del cultivo.

Por esta razón se hace necesaria la búsqueda de fuentes alternativas para el aporte orgánico de nitrógeno, y mejorar su ciclaje en el suelo para obtener una productividad aceptable y atender las demandas del mercado, ya que en la actualidad, se registra una producción de azúcar orgánica cercana a 74.000 quintales/año, de un total de 4.900.000 quintales de azúcar al año, siendo una de las líneas de producción más rentables en el Ingenio Providencia S.A.

El uso de abonos verdes es una alternativa de la agricultura orgánica utilizada para aportar nutrientes, carbono orgánico y mejorar las propiedades de los suelos. Esta práctica agronómica utiliza las plantas principalmente leguminosas como abono en rotación, sucesión y alternancia de cultivos.

En este sentido, Prager *et al* (2012), plantean que esta alternativa de utilizar abonos verdes AV o la siembran en asocio y/o rotación con los cultivos de interés comercial mejoran la disponibilidad del N en el suelo, el ciclaje de materia orgánica y nutrientes. Las leguminosas, generalmente, son utilizadas como AV gracias a su potencial simbiótico con bacterias rizosféricas que fijan el N₂ atmosférico, lo asimilan en su biomasa y, finalmente, lo aportan al suelo mediante el proceso de mineralización. Una leguminosa comúnmente utilizada como AV en cultivos comerciales es el frijol Caupí *Vigna unguiculata* L., gracias a su rápido crecimiento, baja interferencia y alta capacidad adaptativa al medio (Prager *et al*, 2012).

Sin embargo, existe poca información sobre su potencial simbiótico en condiciones de campo, el aporte nitrogenado al suelo y su frecuencia de siembra en el agroecosistema. Esta información permitiría identificar labores de campo, que por un lado mejoren la productividad del cultivo de interés comercial y, por otro, optimicen recursos escasos como el agua y los nutrientes.

De esta manera, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la respuesta fisiológica del frijol caupi asociado a un cultivo orgánico de caña de azúcar, en el municipio de El Cerrito- Valle del Cauca y evidenciar la efectividad del aporte nitrogenado de diferentes enmiendas orgánicas. A través de los resultados, se pretende hacer un aporte al conocimiento e innovación en tecnologías de cultivo como los AV y, al tiempo demostrar competencias profesionales en Agronomía dentro del proceso de formación integral de los investigadores, en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Evaluar la respuesta fisiológica del AV frijol caupi *Vigna unguiculata* a la inoculación de bacterias diazotróficas, asociado al cultivo orgánico de caña de azúcar *Saccharum officinarum* / var. Cenicaña 8592, en el municipio de El Cerrito – Valle del Cauca.

1.2 Objetivo Especifico

-Evaluar la respuesta del frijol caupí (*Vigna unguiculata*) a la inoculación de bacterias diazotróficas de los géneros *Azotobacter* y *Rhizobium* en condiciones de campo sembrado en las calles de la soca de caña de azúcar variedad 8592.

-Estimar la incidencia de los tratamientos en la dinámica del N inorgánico del suelo y su relación con la respuesta fisiológica del AV frijol caupí (*Vigna unguiculata*) asociado al cultivo de caña de azúcar.

2. Marco Teórico

2.1. Antecedentes

La caña de azúcar llegó a Cali traída por Sebastián de Belalcázar, quien la cultivó en su estancia de Yumbo, en 1541. De allí el cultivo se diseminó por la cuenca del río Cauca (Asocaña, 2012). Hacia 1550 se fundaron tres ingenios a orillas del río Amaime y desde esta región se envió azúcar y miel a Panamá en 1588. Para 1721 había en el Valle del Cauca 33 trapiches en funcionamiento (Procaña, 2012).

Los rudimentarios trapiches permitieron el surgimiento de los primeros ingenios azucareros en la región, pues el aumento de los productos de la estancia y la dinámica comercial que empezó a surgir a su alrededor, que incluyó exportaciones de azúcar desde épocas tan tempranas como 1589 a lugares como Panamá, Antioquia y Quito, llevó a un aumento de la rentabilidad de la tierra y, en el largo plazo, a la transformación de las estancias en haciendas, cuando a finales del siglo XVII la minería del Chocó amplió la demanda sobre las mieles, el azúcar y los aguardientes del Valle (Bermúdez , 2012)

El aumento en la demanda obligó a mayores inversiones en tecnología que incluyó trapiches de hierro, pero principalmente mano de obra, pues la indígena venía en un acelerado proceso de desaparición. La población de origen africano llegó masivamente debido a la apertura de la frontera minera del Chocó, lo cierto es que la presencia de esclavos negros en las haciendas vallecaucanas se explica por las necesidades de cultivos exigentes en mano de obra como la caña de azúcar y la producción de los ingenios. Igualmente, el aumento de la población trabajadora en las minas llevó a la ampliación de

la demanda de productos de las haciendas, especialmente de los derivados de la caña, tales como raspadura, alfandoque, alfañique, melcocha, guarapo, aguardiente, miel, azúcar, miel de purga y rallado, dulce que se hacía con cáscara de naranja, limones o sidras.

Durante la Colonia, la producción de panela, azúcar y mieles fue una tarea artesanal y así permaneció hasta comienzos del Siglo XX, cuando se inauguró una moderna planta en el Ingenio Manuelita. Para 1930 sólo había tres ingenios en el Valle del Cauca: Manuelita, Providencia y Río paila; desde esos años la industria azucarera empezó a expandirse en la región hasta completar 22 ingenios (Asocaña, 2012).

De esta forma la caña de azúcar se convirtió en el más importante cultivo del Valle del Cauca, no sólo por la variedad de subproductos, sino por una racionalidad que va más allá de la utilizada en otros cultivos, lo que nos recuerda conceptos tan actuales como sostenibilidad, ambientalismo y reciclaje--, pues se corta la caña, se selecciona la semilla, el cogollo se utiliza en la alimentación de animales, el tallo ofrece el jugo, el bagazo se utiliza como combustible y la ceniza como abono.

El Estado colonial hizo de este cultivo uno de sus más importantes renglones rentísticos por medio del cobro del diezmo sobre la miel y el establecimiento del estanco de aguardiente. Desde luego, en la zona azucarera por excelencia, la de Palmira, El Cerrito y Guacarí, se constituyeron los partidos donde los remates de rentas alcanzaron los niveles más altos, pues sólo en esta zona había trece trapiches a finales del siglo XVIII y modernos ingenios en el siglo XX, cuyo crecimiento y consolidación llevó finalmente a que la caña se impusiera en el sector agropecuario y el azúcar en el industrial (Bermudez , 2012).

El Valle se había convertido en el mayor productor azúcar en el país. En la década de 1940 a 1949 nuevos empresarios montaron ingenios. Hoy el sector agroindustrial de la caña de azúcar, genera más de 188 mil empleos en 47 municipios correspondientes a cinco departamentos del valle geográfico del río Cauca (Procaña, 2012).

En el siglo XX surgió en el Valle del Cauca, Colombia, un clúster o conglomerado productivo en torno a la caña de azúcar. El conglomerado, compuesto por cientos de empresas dedicadas a una gran variedad de productos y servicios, constituye la columna vertebral del desarrollo económico y social de Cali y el Valle del Cauca (Centro Nacional de Productividad Colombia. CNP, 2002)

2.2 Requerimiento de suelo del cultivo de caña de azúcar

El suelo es el medio para el crecimiento de las plantas, el cual proporciona nutrientes, agua y anclaje para su crecimiento. El mantener las condiciones físicas, químicas y biológicas adecuadas en el suelo, es muy importante para lograr mayor crecimiento, rendimiento y calidad de la caña de azúcar.

Blackburn (1984) citado por Quintero (1995), afirma que la caña de azúcar crece bien en diferentes tipos de suelos, pero prefiere los francos o franco-arcillosos, bien drenados y profundos. El pH óptimo para su desarrollo es de 6.5 (ligeramente ácido), aunque tolera suelos ácidos hasta alcalinos. Con un pH próximo o menor de 4.5, la acidez del suelo limita la producción, principalmente por la presencia de aluminio intercambiable y de algunos micro nutrimentos como hierro y manganeso que pueden ocasionar toxicidad y muerte de la planta. De igual manera el autor menciona que los

requerimientos de clima y suelo difieren de acuerdo con las variedades de caña y el manejo de éstas.

2.3 Fisiología del cultivo de caña de azúcar

Las plantas absorben los elementos minerales de las proximidades de las raíces; no obstante, la presencia de un elemento en particular en un cultivo determinado no es una prueba para considerarlo esencial para el desarrollo de dicho cultivo (Malavolta, 1992). Existen 16 elementos nutritivos esenciales para la caña de azúcar: el carbono, el hidrógeno y el oxígeno no son minerales y la planta los toma del bióxido de carbono y del agua (Tisdale y Nelson, 1966; mencionados por Quintero, 1995). Los nutrientes restantes son: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre. Los micronutrientes son: boro, cinc, cloro, cobre, hierro, manganeso y molibdeno; estos últimos, aunque son necesarios para el normal desarrollo de la planta, se requieren en cantidades muy pequeñas.

La cantidad de nutrimentos que extrae un cultivo es diferente de acuerdo con la variedad, el tipo de suelo, las condiciones de clima y el manejo del cultivo (Quintero, 1995). Además, el conocimiento de los requerimientos de los cultivos es una ayuda valiosa en la ejecución de programas de fertilización, si se toma como base el resultado del análisis de fertilidad del suelo y de sus características físicas más importantes (Malavolta, 1992).

Martin *et al.*, (1987), encontraron que la extracción de nutrimentos por cuatro variedades de caña de azúcar en tres tipos de suelos, varió entre 0.44 y 1.15 kg de N, 0.11 y 0.30 kg de P, y 0.77 y 2.19 kg de K por tonelada de tallos maduros cosechados. Malavolta (1992) encontró que en los tallos la

extracción de nutrimentos fue: 0.72 kg de N, 0.18 kg de P, 1.22 kg de K, 0.12 kg de Ca, 0.20 kg de Mg y 0.27 kg de S, mientras que en los cogollos y en las hojas secas la extracción fue: 1.15 kg de N, 1.39 kg de P, 1.18 kg de K, 0.68 kg de Ca, 0.32 kg de Mg y 0.16 kg de S por tonelada de caña industrial.

De igual manera se observó que por cada 100 toneladas de tallos de caña, la planta extrae entre 178 y 238 g de B, 138 y 271 g de Cu, 1486 y 6189 g de Fe, 758 y 1509 g de Mn, y 387 y 479 g de Zn. Estas cantidades corresponden a plantillas establecidas en tres tipos de suelos. La extracción de micronutrientes en este estado es superior a la de las socas.

Según estudios realizados por el Ministerio de agricultura a través del ICA, en un suelo Inceptisol del valle geográfico del río Cauca se encontró que por cada 100 toneladas de tallos listos para molienda, la variedad CENICAÑA Colombia (CC) 83-25 produjo 25 toneladas de hojas y 15 toneladas de yaguas (Quintero, 1995). Con base en el análisis de cada uno de estos componentes de la planta, se estimó que la Fertilización y Nutrición extracción total de nutrimentos (en kilogramos) por cada tonelada de tallos que se cosechó, fue: N = 1.53, P = 0.43, K = 2.85, Ca = 1.15 y Mg = 0.43. Debido a la descomposición paulatina de las hojas y las yaguas que permanecen en el campo como residuos de cosecha, la extracción real de nutrimentos por cada tonelada de tallos fue: 0.70, 0.22, 1.38, 0.19 y 0.20 kg de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente.

Estas diferencias entre las extracciones total y real de nutrimentos por la planta de caña, indican la importancia del manejo de los residuos de cosecha, no solamente por sus contenidos de nutrimentos, sino también por sus efectos en las condiciones físicas de los suelos. (Instituto Colombiano Agropecuario. ICA, 1989)

2.4 Subproductos de la agroindustria azucarera como fuente de nutrimentos

2.4.1 Cachaza

La cachaza está formada por los residuos que se obtienen en el proceso de clarificación del jugo de la caña durante la elaboración del azúcar crudo. Es un material oscuro, constituido por la mezcla de fibra, coloides coagulados, cera, sustancias albuminoides, fosfatos de calcio y partículas de suelo (Aguilar, 2008).

La producción de cachaza es en promedio, de 30 kg por cada tonelada de caña que se muele (Procaña, 2010) Generalmente, se aplica en suelos próximos a las fábricas de los ingenios, ya que su alto contenido de humedad aumenta el costo del transporte.

Según estudios realizados por (Malavolta, 1992); Entre los componentes de la cachaza fresca sobresalen la M.O., el calcio, el fósforo y el nitrógeno. Después de 13 semanas de descomposición de este subproducto, disminuyen la humedad, la M.O. y los nutrimentos antes mencionados, y aumentan el hierro, el cobre y la actividad microbiana.

En el comercio existen productos a base de microorganismos que se utilizan para acelerar los procesos de descomposición de los residuos orgánicos. En el centro de investigación de caña de azúcar CENICAÑA se evaluó el iniciador bacteriano Fabearth 110/120, y se encontró después de 13 semanas de descomposición, que las características de la cachaza inoculada

fueron similares a la cachaza sin inocular, aunque se observaron algunos cambios en la relación C/N y en el contenido de M.O., que indican que el inóculo aceleró los procesos de descomposición (Quintero, 1995).

En Inceptisoles, Mollisoles y Vertisoles, la cachaza fresca aplicada a voleo e incorporada en los primeros 20 cm de profundidad, aumentó la producción de la variedad CP 57-603; en la plantilla y en el primer corte no se justificaron las aplicaciones superiores a las 100 t/ha de cachaza fresca y los mayores efectos residuales en el segundo y tercer cortes se obtuvieron con 300 t/ha de cachaza (Malavolta, 1992).

De acuerdo a los resultados el mismo autor manifiesta que en los ensayos anteriores encontró que la cachaza afectó algunas propiedades químicas de los suelos aumentando ligeramente el pH y los contenidos de M.O. y de potasio intercambiable, pero el efecto más importante ocurrió con el fósforo disponible, ya que un mes después de la aplicación los contenidos de este nutrimento en algunos suelos, que inicialmente eran bajos, alcanzaron valores muy altos, los cuales fue posible mantener después de tres cortes consecutivos con aplicaciones de 200 t/ha de cachaza. Por lo anterior, este subproducto es considerado como un buen sustituto de fertilizantes fosforados para algunos suelos del valle geográfico del río Cauca. (Malavolta, 1992).

En Inceptisoles y Entisoles de baja fertilidad del piedemonte del valle geográfico del río Cauca, con la aplicación de 100 t/ha de cachaza fresca en los surcos al momento de plantar la variedad MZC 74-275, se encontró en uno de estos suelos —*Typic Humitropept*— con 5% de M.O., que la concentración de sacarosa en la plantilla disminuyó, debido posiblemente a un suministro tardío de nitrógeno, lo cual es una característica de este

subproducto. Sin embargo, las producciones de caña y de azúcar de esta variedad mostraron que con la aplicación de 3 t/ha de cachaza descompuesta e inoculada, es posible sustituir entre el 25% y el 50% del nitrógeno, el fósforo y el potasio, que normalmente se aplican en la plantilla y en la primera soca (Malavolta, 1992).

Las aplicaciones de cachaza descompuesta en dosis relativamente bajas han sido más efectivas en plantilla que en socas, posiblemente porque en la primera se coloca en el fondo del surco, mientras que en las socas se aplica en banda. De todas maneras, es importante tener en cuenta que la cachaza descompuesta es un complemento de los fertilizantes comúnmente utilizados en el cultivo de la caña de azúcar.

2.4.2 Compost y cenichaza.

La “cenichaza” es el producto de la mezcla de la cachaza con las cenizas del bagazo usado como combustible en las calderas de los ingenios (Quintero, 1995). Cuando estos subproductos se mezclan en una proporción de 1:1 (peso húmedo) y se dejan descomponer durante 13 semanas, se obtiene un abono alcalino con relación C/N adecuada, pero con menor contenido de M.O., nitrógeno, fósforo, calcio y magnesio, y mayor contenido de potasio que la cachaza descompuesta (Procaña, 2010). En Inceptisoles y Entisoles, la aplicación de 10 t/ha de cenichaza en el fondo del surco, no aumentó en forma significativa la disponibilidad de nitrógeno para la variedad MZC 74-275. Pero, fue más eficiente que el superfosfato triple en el suministro de fósforo y que la cachaza descompuesta en el suministro de potasio.

En un Entisol con drenaje pobre, con bajo contenido de fósforo disponible y altos contenidos de M.O. y potasio intercambiable, se encontró que con la

aplicación de 10 t/ha de cenichaza en el fondo del surco, más el 75% de las dosis de nitrógeno, fósforo y potasio que normalmente se aplican en plantilla y del nitrógeno que se aplica en las socas, es posible obtener producciones relativamente altas de caña y de azúcar.

2.4.3. El compostaje

El compostaje es una técnica centenaria que aplica para residuos secos y fibrosos. No es aplicable a la vinaza líquida ni concentrada en sí, pero las vinazas pueden ser añadidas al proceso de compostaje de otros residuos (compostaje). Una tecnología similar se utiliza para lodos de depuradoras, así como para los lodos de la industria petrolera. La cachaza de los ingenios azucareros es un sustrato ideal para compostaje. El compostaje de la cachaza permite reducir su humedad, volumen y peso, y en consecuencia reducir sus costos de transporte y de aplicación. Por esta razón este compostaje suele justificarse económicamente, con y sin adición de vinazas. Un Ingenio de 5.000 ton/día de caña podía en el Valle del Cauca produce hasta 300 ton diarias de cachaza (Conil, 2006). En otras partes del planeta (países que tienen una zafra limitada a la estación seca) la producción de cachaza es un poco menor por tonelada de caña molida, pero esta cachaza es más seca y orgánica que en Colombia, donde la cosecha de la caña a lo largo del año arrastra mucha tierra. La adición de vinaza al compostaje de cachaza se hace desde hace más de 20 años en el mundo, con bastante éxito. Sin embargo las cantidades añadidas son generalmente menores de 1 m³ de vinaza por tonelada de cachaza. Esta proporción no permite dar una “solución” al manejo de las vinazas pues representa una parte pequeña de la vinaza generada. Un ingenio de 5.000 t/día con destilería (60% jugo + 40% melaza) produce 150.000 litros de alcohol al día y 2.000 m³ de vinazas al

día, de las cuales solo 300 m³ (15%) pueden ser incorporadas al compostaje de la cachaza.

Dos vías existen para aumentar este porcentaje: (1) la recirculación de las vinazas dentro de la destilería, para reducir el volumen de descarga (pero aumentar su concentración). Se puede llegar a generar solo 600 m³ de vinaza por día al 17% de ST, en vez de 2.000 m³ al 5%; y (2) La concentración de las vinazas por evaporación. Ambos sistemas son factibles, con sus ventajas y desventajas. Pueden también ser combinados. Debe de aclararse que la concentración de las vinazas por evaporación tiene un costo relativamente alto de energía, así como de químicos para el lavado periódico del sistema, y además genera otro tipo de aguas residuales (las flemazas) que deben también ser tratadas. En los mejores casos, la cantidad de vinaza se puede reducir a 4 m³/m³ de alcohol, lo que permite co-compostarlas con cachaza en proporciones de 2 a 1. Es difícil pero factible. Depende de la composición de la cachaza y de la pluviosidad. Es mucho más difícil en Colombia que en países con zafra. Más concentrada la vinaza, más difícil es aumentar su proporción en la mezcla. Al contrario, si hablamos de vinaza tratada, se asemeja a agua de riego y es más sencillo aumentar la dosis de aplicación.

2.4.4. La Vinaza

La vinaza es un residuo de las destilerías de alcohol que se produce en una proporción de 13 litros por cada litro de alcohol obtenido, proporción que puede variar entre 10 y 15 litros de vinaza por litro de alcohol (Quintero, 1995). Este subproducto es alto en el contenido de M.O., potasio, azufre y calcio. La vinaza se puede aplicar en el cultivo de la caña de azúcar por

gravedad o aspersión sobre los surcos. El uso de carro tanques es costoso y generalmente se emplean para aplicar vinazas concentradas en dosis que varían entre 35 y 50 m³/ha (Procaña, 2010). Cuando las aplicaciones se hacen por canales, dirigidas a los surcos (“fertirrigación”), las dosis son superiores a 1000 m³/ha (Quintero, 1995). Por aspersión se aplican entre 200 y 500 m³/ha, según la cantidad de potasio que se desee aplicar en el suelo.

El contenido de potasio intercambiable en el suelo es el criterio que se emplea para determinar la dosis de vinaza que se debe aplicar en las plantaciones, ya que ésta es una fuente importante de este nutrimento. Sin embargo, las aplicaciones de vinaza se deben hacer con ciertas precauciones, ya que las aplicaciones sucesivas en suelos Entic Chromustert de la zona central del valle geográfico del río Cauca han resultado en aumentos excesivos de potasio intercambiable y en disminuciones de la producción de caña y de la concentración de sacarosa en la primera soca de la variedad MZC 74-275 (López, 1992)

2.5 Frijol caupi *Vigna unguiculata* L.

Es una planta arbustiva o trepadora de ciclo corto, 65 a 85 días. Tanto las vainas tiernas como las semillas secas son comestibles. Es un buen sustituto del frijol común, produce cobertura más rápidamente que las otras leguminosas y tolera muy bien la sequía. La *Vigna* produce más biomasa que las otras leguminosas en este mismo periodo de tiempo.

Requiere manejo como cultivo de grano, por lo tanto sus hojas maduras contienen poco Nitrógeno, ya que la mayoría de él se transfiere a las

semillas. Por su rápida cobertura ayuda a controlar muy bien la erosión y las malezas.

El modelo de producción agrícola tradicional que se ha practicado, Es el uso como abono verde, es una de las alternativas de bajo costo y de resultados en corto tiempo. Con ellos se pueden mejorar las condiciones de fertilidad y vida del suelo y a la vez se disminuye la dependencia de fertilizantes químicos (Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2010).

Son plantas con capacidad de adaptarse a diversos suelos y climas, de rápido crecimiento y alto poder de producción de material vegetativo. Se cultivan con el fin de proteger y recuperar el suelo. Se encuentran en forma natural como malezas en áreas no cultivadas.

Estas plantas poseen una cualidad especial de formar nódulos en su raíz. Se alojan bacterias que tienen la capacidad de convivir con las plantas aportándoles nitrógeno. Este lo toma del aire y lo fijan en el suelo, convirtiéndolo en nitrógeno aprovechable por cultivos que posteriormente se establezcan ventajas: Aumenta la capacidad de retención de humedad en el suelo. Protegen el suelo del impacto de lluvia, disminuye la erosión, reducen la evaporación de agua del suelo, Contribuye el calentamiento de la superficie del suelo y reducen la población de malezas, con lo que se disminuyen costos en limpiezas de cultivos. Adicionalmente, contribuye en la restauración de suelos altamente degradados, a través del aporte de materia orgánica. Se reducen las dosis de fertilizantes químicos, incidiendo en la disminución de costos de producción.

Se interrumpen ciclos de plagas y enfermedades, al incluir abonos verdes en planes de rotación de cultivos. Permiten la desintoxicación de los suelos para

iniciar procesos de agricultura orgánica, eliminando residuos tóxicos de materiales químicos.

2.5.1. Uso del frijol Caupí como Abono verde en sistemas de cultivo

Hay que tener claro que un abono verde (AV) es un cultivo utilizado principalmente como una enmienda del suelo y una fuente de nutrientes para los cultivos posteriores. Enfoques de abono verde a la producción de cultivos puede mejorar la viabilidad económica, la reducción de los impactos ambientales de la agricultura. Sin embargo, estos enfoques son complejos porque dependen de las interacciones entre el Microorganismo, el medio ambiente y la gestión de los mismos.

En los últimos años, esencialmente motivos ambientales han llevado a renovar el interés por el uso de leguminosas herbáceas como abonos verdes, puesto que su empleo supone un ahorro económico importante para el agricultor y por sus efectos benéficos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Para que los abonos verdes sean considerados una efectiva fuente de nutrientes para los cultivos que se implanten posteriormente, deben estar disponibles en los momentos de mayor demanda del cultivo y para ello se hace necesario conocer la velocidad de descomposición de la biomasa vegetal aportada al suelo y la subsiguiente liberación de nutrientes (Shindoi *et al.*, 2012). En un Argiudol Típico se realizó la incorporación de caupí a los 74 días después de su siembra, se determinó su tasa de descomposición empleando la técnica de litterbags y cada 30 días se determinaron peso seco y N, P y K foliar. Se calcularon los porcentajes de masa seca remanente (%MSR), la tasa de descomposición y liberación de los nutrientes analizados. La producción

promedio de caupí fue de 7603 kg MS ha⁻¹, correspondiendo el 63,9% a las hojas y el 36,1% a tallos. La velocidad de descomposición durante los 30 días iniciales fue rápida con un %MSR = 36; que posteriormente se estabiliza. La tasa de liberación de N, P y K es máxima también durante los primeros 30 días.

La asociación de las gramíneas con especies arbóreas o arbustivas incrementa la producción de biomasa disponible y mejora el contenido proteico de los pastos. En este sentido Hernadez, Carballo y Reyes, (2000) reportaron que la siembra de *Leucaena leucocephala* sobre pastizales degradados de pastos mejorados, como *Cynodon nlemfuensis*, *Panicum maximum* y otros, mediante el empleo de técnicas de laboreo mínimo, esto ha permitido duplicar la disponibilidad de MS en comparación con la obtenida en pastizales en monocultivo.

Este incremento en la disponibilidad de los pastos puede deberse a que en los sistemas con árboles asociados, estos se someten a podas periódicas y el follaje es depositado como mulch o cobertura sobre la superficie del suelo o incorporado como abono verde, lo que mejora el contenido de materia orgánica y de otros nutrientes, particularmente el nitrógeno (Cherr, Scholberg y McSorley, 2006).

El forraje de la caña (*Saccharum officinarum*) presenta como limitante su bajo contenido proteico, por lo que se deben buscar alternativas para incrementar este indicador; al incluir *Macroptilium atropurpureum* en la dieta con caña, el contenido de proteína se incrementó. Sin embargo, el empleo de árboles leguminosos en plantaciones de caña de azúcar no es una práctica común en el mundo por tratarse de una especie heliófila. En Cuba el primer trabajo que se conoce fue el desarrollado por Hernández, Simon y Sánchez, (2005),

en el que se analizó el comportamiento forrajero de la caña durante el primer año en asociación con tres leguminosas arbóreas. Los ensayos de campo se establecieron en cuatro localidades de Mauritius 2003 a 2006 para determinar la contribución de LGM para la nutrición de la caña de azúcar y N si LGM en parte podría sustituir fertilizantes minerales Data N. mostraron que los rendimientos de N a los suelos de los cultivos LGM osciló entre 100 y 267 kg N ha de los cuales entre el 50 y el 70% se obtuvo a partir de la fijación biológica. La disponibilidad de N en la biomasa de leguminosas para el cultivo de la planta de caña posterior, según lo determinado por la técnica de dilución N, osciló entre 21 y 44 kg N ha. Incorporación de LGM antes de plantar rendimiento significativamente mayor de caña planta fertilizado con la mitad de la tasa recomendada de mineral N. Sobre la base de los resultados de este estudio, la tasa actual de fertilizante N para la planta y caña de retoño primero después de un cultivo de LGM se puede reducir por medio sin una pérdida en el rendimiento.

2.6 El nitrógeno como elemento fundamental en el desarrollo de las plantas.

El nitrógeno molecular es el principal constituyente de la atmósfera. La concentración de nitrógeno es resultado del balance entre la fijación del nitrógeno atmosférico por acción bacteriana, eléctrica y química, y su liberación se realiza a través de la descomposición de materias orgánicas por bacterias o por combustión. Es un constituyente esencial de moléculas fundamentales de todos los seres vivos: aminoácidos, proteínas, ácidos nucleídos, vitaminas, entre otros. En estado combinado, el nitrógeno se presenta en diversas formas. Para que el nitrógeno pueda ser asimilado, es necesario que sea reducido, los únicos seres vivos capaces de realizar esta

reacción son las Eubacteria y Archaea, por el proceso denominado fijación biológica de nitrógeno (FBN) (Baca *et al.*, 2000, citado por Obando, 2012)

2.6.1 Ciclo del Nitrógeno en la naturaleza.

La atmósfera es el principal reservorio de nitrógeno donde constituye hasta un 78% de los gases. Sin embargo, como la mayoría de los seres vivos no pueden utilizar el nitrógeno atmosférico para elaborar aminoácidos y otros compuestos nitrogenados, dependen del nitrógeno presente en los minerales del suelo. Por lo tanto, a pesar de la gran cantidad de nitrógeno en la atmósfera, la escasez de nitrógeno en el suelo constituye un factor limitante para el crecimiento de los vegetales.

El ciclo del nitrógeno consta de las siguientes etapas:

-Proteólisis: El nitrógeno no está disponible debido a su forma no asimilable por la plantas; razón por la que los microorganismos desempeñan un rol determinante como degradadores del nitrógeno orgánico para que pueda quedar libre y pueda ser reutilizado. Este proceso se debe a que los microorganismos poseen la capacidad de sintetizar proteinasas extracelulares que transforman las proteínas en unidades más simples (péptidos), los cuales son degradados obteniendo como producto final la liberación de aminoácidos individuales. El nitrógeno de las proteínas (y de los ácidos nucleídos) se debe considerar como el final de la línea de síntesis de compuestos nitrogenados (Obando, 2012).

-Amonificación: Los productos finales de la proteólisis son los aminoácidos. Estos compuestos suelen ser degradados a compuestos simples por los organismos que viven en el suelo (bacterias y hongos), los cuales utilizan las

proteínas y aminoácidos para formar las proteínas que necesitan y liberar el exceso de nitrógeno como amoníaco (NH_3) o amonio (NH_4^+). Este proceso se denomina amonificación (Baca *et al*, 2000). Nitrificación: Según (Pelczar *et al*, 1993), la oxidación del amoníaco a nitritos se llama nitrificación. Una de las actividades de mayor importancia de algunas bacterias autótrofas son las reacciones de oxidación que proporcionan a estos microorganismos la energía requerida para procesos celulares. La nitrificación se da en los siguientes pasos: Un grupo de bacterias (*Nitrosomonas* sp. y *Nitrococcus* sp.) oxidan el amoníaco a nitrito (NO_2^-).



Otro grupo de bacterias (*Nitrobacter* sp.) transforman el nitrito en nitrato, por este motivo no se encuentra nitrito en el suelo, que además es tóxico para las plantas. Desde el punto de vista de la fertilidad del suelo, el producto de estas reacciones (nitratos) es la forma más accesible para las plantas.



-Desnitrificación: Algunos microorganismos son capaces de transformar nitratos a nitrógeno gaseoso u óxidos nitrosos. Este proceso se denomina Desnitrificación y conlleva a pérdidas de nitrógeno en el suelo. Algunos de los microorganismos relacionados en la reacción son *Thiobacillus denitrificans* (autótrofo), *Micrococcus denitrificans* (heterótrofo) y algunas especies de heterótrofos más comunes perteneciente a los géneros *Serratia*, *Pseudomonas*, y *Achromobacter*. La Desnitrificación se disminuye en suelos bastante aireados, que tienen cantidades moderadas de materia orgánica y nitratos; y sucede abundantemente en suelos saturados de agua (anaerobios) y ricos en sustancias orgánicas (Baca *et al*, 2000)

Las relaciones que existen entre las formas de los compuestos del Nitrógeno y los cambios que ocurren en la naturaleza, se ilustran en la Figura 1.

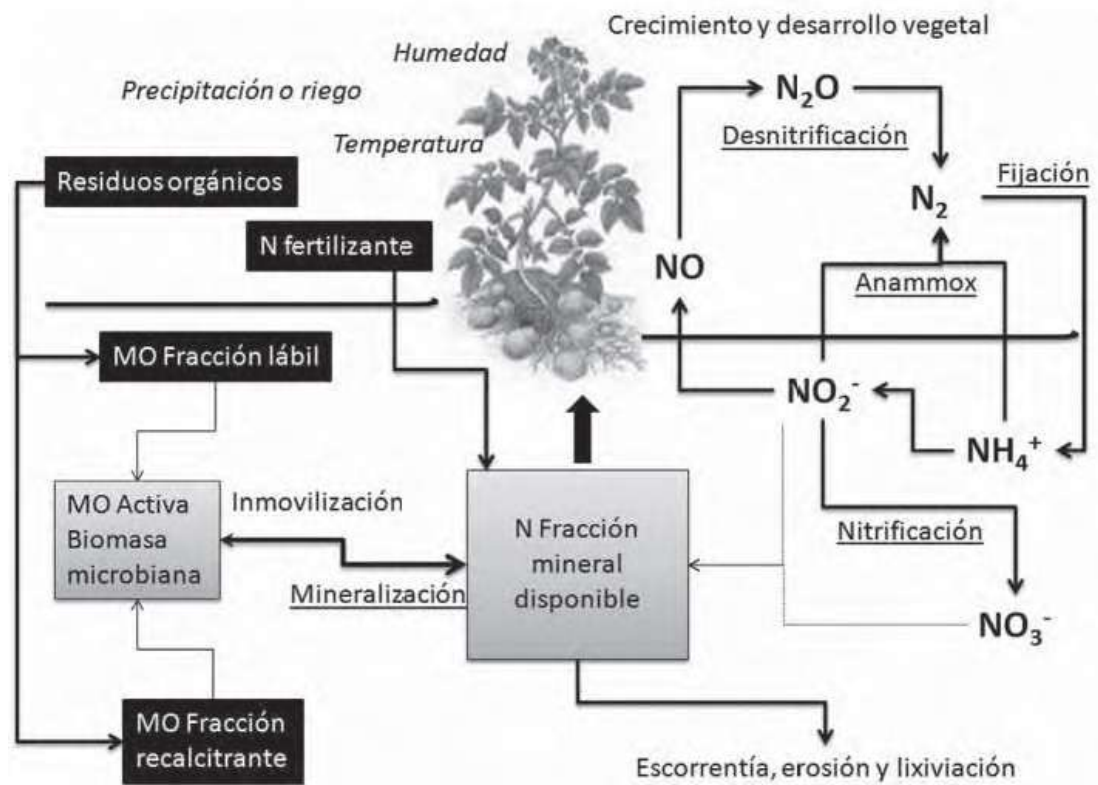


Figura 1. Relaciones entre el ciclo del nitrógeno y los compartimentos orgánicos y minerales.

Fuente: Cerón y Aristizábal (2012).

Los cuadros negros son las entradas al sistema, los grises las fracciones disponibles; sin recuadro procesos y factores que tienen influencia en la disponibilidad de nitrógeno (MO: Materia orgánica).

2.6.2 Fijación biológica de nitrógeno (FBN)

La FBN es el proceso que transforma el nitrógeno atmosférico, que es inerte, en una forma biológicamente útil siendo la principal forma de entrada en

ecosistemas desérticos (Zahran, 2001; citado por Rivera, 2012). Químicamente, la fijación de nitrógeno es similar al proceso Haber-Bosch ($N_2 + 2H_2 \rightarrow 2NH_3$, 500°C y 350 atm), método comercial de la producción de amoníaco para fertilizantes nitrogenados, que consume una gran cantidad de energía. Se estima que se necesitan 1,5 kg de combustible por cada kg de nitrógeno fijado.

El proceso de FBN es utilizado en la naturaleza por diferentes géneros bacterianos. Las plantas se benefician de este proceso cuando las bacterias mueren y liberan el nitrógeno al suelo o cuando las bacterias viven en estrecha asociación con las plantas (Obando, 2012). Si bien existe una amplia gama de organismos y asociaciones vegetales que son capaces de fijar nitrógeno de la atmósfera, la relación simbiótica entre rizobios y leguminosas es responsable de contribuir con la mayor cantidad de nitrógeno fijado en especies agrícolas (Baca *et al.*, 2000).

La fijación de nitrógeno en la biosfera se estima en unos 275 millones de toneladas anuales, de los cuales 30 corresponden a causas naturales, 70 a fijación industrial y 175 al proceso de fijación biológica (Rivera, 2012), por parte microorganismos diazotróficos a simbióticos (de vida libre) y simbióticos (mutualistas obligados). Las entradas en los ecosistemas terrestres de FBN a partir de la relación simbiótica entre leguminosas y sus rizobios es de 70.000.000 toneladas de N_2 /ha/año (Baca *et al.*, 2000). Esta cantidad puede aumentarse en la medida que la población mundial se incremente y las fuentes naturales que suplen los fertilizantes nitrogenados disminuyan.

2.7 Microorganismos diazotróficos

2.7.1 Microorganismos Diazotróficos Asimbióticos

Las bacterias diazótrofes asimbióticas son aquellas que poseen capacidad de fijar nitrógeno atmosférico sin la necesidad de formar una simbiosis con plantas, debido a que estas disponen de diferentes mecanismos de protección del complejo nitrogenasa. Además de fijar el nitrógeno atmosférico, estas bacterias favorecen el desarrollo del sistema radical de la planta con la cual conviven, a través de la producción de reguladores de crecimiento u hormonas (Obando, 2012), favoreciendo una mayor absorción de nutrientes por parte de la planta. Como resultado de esta asociación se han obtenido incrementos del orden de 5% a 30% en los rendimientos de caña de azúcar, maíz, arroz, trigo y gramíneas forrajeras.

Estas bacterias se encuentran prácticamente distribuidas en todos los hábitats. Entre los principales géneros que se encuentran en vida libre o endófitos asociados a la rizósfera se destacan: *Azotobacter*, *Azotococcus*, *Azospirillum*, *Beijerinckia*, *Azotomonas*, *Bacillus*, *Citrobacter*, *Clostridium*, *Chromatium*, *Chlorobium*, *Desulfovibrio*, *Desulfomonas*, *Gluconacetobacter*, *Herbaspirillum* y *Klebsiella* (Rodríguez *et al.*, 2003).

2.7.2 Microorganismos diazotróficos simbióticos

Las bacterias diazotróficas simbióticas son aquellas que son capaces de fijar nitrógeno atmosférico en simbiosis con las raíces de plantas leguminosas. Estas raíces presentan nódulos en cuyas células se alojan las bacterias fijadoras de nitrógeno; toman ácidos orgánicos de las plantas y contribuyen con compuestos nitrogenados como los ureidos y las amidas de reserva.

Este tipo de fijación de nitrógeno es muy eficiente al recibir las plantas los compuestos nitrogenados directamente de los microorganismos nitrificadores que viven en simbiosis. Se han descrito 40 especies en nueve géneros de bacterias que forman nódulos en leguminosas, no obstante, existen bacterias simbióticas que pueden colonizar otras plantas; por ejemplo, *Rhizobium leguminosarum* y cepas fotosintéticas de *Bradyrhizobium* sp. Encontradas en raíces de arroz *Rhizobium etli* en raíces de maíz (Obando, 2012).

2.7.2.1 Género *Rhizobium* sp.

La taxonomía de los rizobios ha cambiado considerablemente en los últimos 20 años; el género *Rhizobium*, un miembro de α -Proteobacteria, ahora se divide en varios géneros. Mediante el estudio de plantas promiscuas hospederas dispersas geográficamente se ha constatado que son fuente de muchas especies nuevas. Recientemente, una serie de aislamientos se han registrado en los nódulos de las leguminosas, con capacidad de fijación de nitrógeno, pero filogenéticamente ubicados fuera de los grupos tradicionales de rizobios en α -proteobacterias. Entre las nuevas líneas géneros simbiotes que presentan la fijación de nitrógeno en leguminosas se incluyen *Blastobacter*, *Methylobacterium*, *Devosia*, *Ochrobactrum* y *Phyllobacterium* en α -proteobacterias *Burkholderia*, *Herbaspirillum*, *Ralstonia* y *Cupriavidus* en β -proteobacteria (Young *et al.*, 2003; citado por Obando, 2012).

De la filogenia del 16S rDNA está claro que *Rhizobium* sp. y *Agrobacterium* sp. Están fuertemente relacionadas y sus especies están entrelazadas. Está planteada la transferencia de todos estos taxones de *Rhizobium* sp. y unir a *A. radiobacter* y *A. tumefaciens* en *R. radiobacter*, mientras que *A.*

rhizogenes en *R. rhizogenes*. Por otra parte, *A. rubi* y *A. vitis* se transfieren a *Rhizobium*, como especies distintas y *A. larrymoorei* como *R. larrymoorei*.

Desde la década de los 80, con la introducción de características genéticas (ADN-ADN y las hibridaciones ADN-rARN, catálogos rARN y secuenciación del rADN) fue descubierta una mayor diversidad entre los rizobios y se hizo evidente sus relaciones con otros grupos de bacterias. Esto condujo a un aumento gradual en el número de géneros. En paralelo, también ha aumentado significativamente en el número de especies, con 48 rizobios reconocidos (Obando, 2012).

Los rizobios son bacilos de 0,5 a 1,0 x 1,2 a 3,0 μm , Gram negativos y móviles por flagelos peritricos. Las colonias son usualmente blancas o beige, circulares convexas, semitraslúcidas u opacas, a veces mucoides, usualmente de 2 a 4 mm de diámetro dentro de 3 a 5 días de incubación en medio YMA. El crecimiento en un medio de carbohidratos es usualmente acompañado por abundante cantidad de exopolisacáridos extracelulares. Desarrollan una pronunciada turbidez de 2 a 3 días en caldo aireado o agitado. Son aerobios, su temperatura óptima de crecimiento se encuentra entre 25 y 30 °C; algunas especies pueden crecer a temperaturas de 40 °C. El pH óptimo de crecimiento está entre 6,0 y 7,0; Sin embargo, pueden predominar entre valores de 4,0 a 10,0. El tiempo de generación de las cepas de *Rhizobium* sp. Está entre 1,5 a 5,0 horas (Obando, 2012).

Es quimiorganoheterótrofo, utiliza un amplio rango de carbohidratos y sales de ácidos orgánicos como única fuente de carbono, sin formación de gas. No son capaces de metabolizar celulosa, almidón, caseína, quitina y agar; mientras que la peptona es pobremente utilizada. Las sales de amonio, de nitrato y la mayoría de los aminoácidos pueden servir como fuente de

nitrógeno. Algunas cepas requieren factores de crecimiento como biotina, pantotenato o ácido nicotínico (Young *et al.*, 2003 citado por Obando, 2012)).

2.8 Importancia de la fijación biológica de nitrógeno (fbn) en leguminosas.

El proceso de FBN es utilizado en la naturaleza por diferentes géneros bacterianos. Las plantas se benefician de este proceso cuando las bacterias mueren y liberan el nitrógeno al suelo o cuando las bacterias viven en estrecha asociación con las plantas (Willems, y otros, 2006). Esta asociación simbiótica se presenta en leguminosas con microorganismos denominados rizobios, que viven en los nódulos de las plantas fijando el nitrógeno en forma de amonio, el cual es absorbido por las plantas (Willems, y otros, 2006).

Si bien existe una amplia gama de organismos y asociaciones vegetales que son capaces de fijar nitrógeno de la atmósfera, la relación simbiótica entre rizobios y leguminosas es responsable de contribuir con la mayor cantidad de nitrógeno fijado en especies agrícolas. Aproximadamente el 80% del nitrógeno fijado biológicamente en la agricultura proviene de la simbiosis entre las leguminosas y las especies de *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Sinorhizobium*, *Azorhizobium*, *Mesorhizobium* y *Allorhizobium* (Willems, y otros, 2006).

El empleo elevado e indiscriminado de fertilizantes nitrogenados representa una carga medioambiental, que incluye contaminación del aire, lluvia ácida, contaminación del agua por nitrato, eutrofización y reducción de la biodiversidad (Willems, 2006). Esto indica que la fijación biológica del nitrógeno de tipo simbiótico representa una alternativa económica y ecológicamente viable, que contribuye a mitigar esta problemática de forma sustentable (Willems, 2006).

Teniendo en cuenta que aproximadamente 11g de nitrógeno se consumen por persona cada día (Willems, 2006), que las leguminosas aportan hasta el 80% de las necesidades dietéticas en la mayor parte de los trópicos y subtrópicos (Willems, 2006). Que para el año 2025 se espera que la población mundial haya crecido hasta un 40%(Willems, 2006). Se necesitaría para entonces un incremento desmesurado en la producción agrícola mundial con el fin de disminuir la brecha del abastecimiento de proteína para la población humana (Willems, 2006).

3. Metodología

3.1 Localización

La fase experimental del ensayo se realizó durante los meses de Abril a Junio de 2013 en la Hacienda El Alizal ubicada en el Municipio de El Cerrito en el departamento del Valle del Cauca, a una altura de 1.000 m sobre el nivel del mar, con temperaturas que superan los 24°C.

El área presenta condiciones climatológicas naturales de régimen pluviométrico bimodal con dos períodos de mayores lluvias, los registros anuales son inferiores a los 1.500 mm. En la hacienda se selecciono la suerte 201D con una extensión de 3,68 ha, de las cuales se utilizaron 1,18 has para la distribución entre las parcelas. (Ver anexo 1).

3.2 Suelo

Los suelos están formados por depósitos de origen aluvial, profundos y superficies de alta fertilidad. El suelo predominante es del orden *Pachic Haplustolls*, según (IGAC, CVC, 2004). Topografía plana con una pendiente del 0-3%, familia francosa fina, mezclada, superacactiva. Profundo, de texturas medias y moderadamente finas, bien drenados, reacción del suelo ligera a fuertemente alcalina, capacidad de cambio catiónico medio, contenidos de bases medio, saturación alta y carbón orgánico bajo. Régimen ústico.

3.3 Diseño experimental

Se evaluó la respuesta de la leguminosa fríjol caupi (*Vigna unguiculata* L.) a la fertilización orgánica con vinaza y compost con y sin inoculación. El fríjol fue sembrado en asocio con socas de caña de azúcar (*saccharum officinarum*). Se utilizó un diseño de bloques completos al azar (BCAA) con cuatro repeticiones.

Los tratamientos fueron:

- T1: Fertilización con compost más inoculación
- T2: Fertilización con vinaza y compost con inoculo
- T3: Fertilización Fríjol con inoculo
- T4: Fertilización con vinaza con inoculo
- T5: Fertilización con compost sin inoculo
- T6: Fertilización con vinaza y compost sin inoculo
- T7: Fertilización fríjol sin inoculo
- T8: Fertilización vinaza sin inoculo
- T9: Testigo

El tamaño de la parcela experimental fue de 165 m² el cuál se tomó con base a las distancias de siembra del cultivo de caña de azúcar. Se tuvo en cuenta la densidad de siembra y el efecto de bordes. Se asignaron ocho tratamientos a cada unidad experimental en cada bloque para un total 16 parcelas y un testigo con un área experimental de 2642 m².

Los tratamientos fueron seleccionados con base al uso del fríjol caupi *Vigna unguiculata* L, como abono verde y al tipo de enmienda utilizada en el cultivo de caña de azúcar (abono orgánico). La Figura 2, presenta la descripción de los tratamientos y su distribución en los bloques experimentales:

NORTE

CALLEON PRINCIPAL

Bloque 4				Bloque 3				Bloque 2				Bloque 1				Testigo
Parcela	Parcela	Parcela	Parcela	Parcela	Parcela	Parcela	Parcela	Parcela	Parcela	Parcela	Parcela	Parcela	Parcela	Parcela	Parcela	Parcela
16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
tratamiento	tratamiento	tratamiento	tratamiento	tratamiento	tratamiento	tratamiento	tratamiento	tratamiento	tratamiento	tratamiento	tratamiento	tratamiento	tratamiento	tratamiento	tratamiento	
vinaza	compost	frijol solo	vinaza+compost	vinaza+compost	frijol solo	compost	vinaza	vinaza+compost	vinaza	compost	frijol solo	compost	vinaza + compost	frijol solo	vinaza	
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	surcos	
con	con	con	con	con	con	con	con	con	con	con	con	con	con	con	con	
sin	sin	sin	sin	sin	sin	sin	sin	sin	sin	sin	sin	sin	sin	sin	sin	
inoculo	inoculo	inoculo	inoculo	inoculo	inoculo	inoculo	inoculo	inoculo	inoculo	inoculo	inoculo	inoculo	inoculo	inoculo	inoculo	

Figura 2. Descripción de tratamientos en campo.

Fuente: Gómez y Gutiérrez (2014).

3.4 Establecimiento de las parcelas

El establecimiento del cultivo de frijol caupi, en las parcelas experimentales se realizo de forma mecanizada con tractor y sembradora, en las calles de la soca de caña de azúcar variedad 8592, utilizándose semilla comercial, con una cantidad de 17 Kg/ha y una densidad de 15 plantas/ m lineal a doble surco; entre surcos de caña de azúcar a una distancia de 1,65 m entre surcos.

En las parcelas se realizó una deshierba o arranque de arvenses a los 85 días de la siembra, se aplico riego por gravedad desde la siembra hasta la germinación del frijol con un consumo de 1300 m³ /ha por medio de tubería de ventana.

Las semillas se inocularon con Nufosol. S.L a razón de 20 cm³ / L de agua, aplicado con bomba espaldera (200 g/bomba de 10 L). El frijol caupi se incorporo como abono verde a los 65 días después de la siembra. La incorporación del abono verde se realizo con herramienta de mano (pala) a una profundidad de 5 cm evitando disturbar el suelo. El abono orgánico utilizado fue compost y vinaza (ver características en anexo 2), los que se utilizaron en los tratamientos a razón de 10 ton/ha y 6000 L/ha respectivamente.

3.5 Toma de muestras de suelo.

Al inicio del ensayo después de realizar labores de mecanización, o disturbar el suelo, se tomaron muestras compuestas para evaluar las propiedades químicas del lote. El muestreo se llevo a cabo entre lo 0-20cm y 20-40 cm de profundidad por ser el área de acción de las raíces. Las muestras se

recolectaron en bolsas plásticas de 2kg se homogenizaron y se transportaron al laboratorio para el análisis correspondiente, todo conforme a los protocolos de manejo descritos por el laboratorio de campo del Ingenio Providencia (IPSA) (solución nitro perclórica).

A los 60 días del ensayo se tomaron nuevamente muestras de suelo y de igual manera se evaluaron los siguientes parámetros: pH (potenciómetro 1:1), capacidad de intercambio catiónico, contenido de materia orgánica, nitrógeno total, óxido de calcio, óxido de magnesio y la presencia de micronutrientes (S, B, Cu, Fe, Mn, Zn).

3.6 Evaluación de la capacidad de promoción de crecimiento vegetal

3.6.1 Germinación

Se estimó la germinación efectiva a razón de número de plantas por metro (GENP) en porcentaje (%).

3.6.2 Longitud y biomasa

A los 13 días se determinó la longitud de la parte aérea medida como altura de planta en metros (AP), peso seco de las plantas (PSP), peso de la planta en g (P/P), No nódulos/plantas, Peso nódulos/plantas (g), Peso promedio de nódulos, Tamaño de nódulos Micras.

En la tabla 1, se observan los tiempos para las mediciones realizadas.

Tabla 1. Descripción de los periodos de muestreo.

Muestras	Descripción	Días
Muestra inicial		
Muestra 1	Análisis químico de los lotes	0
Muestra 2	Análisis químico insumos compost y vinaza	0
Muestra el ensayo		
Muestra 1	Análisis químico de las parcelas	60
Muestra 3	Análisis peso húmedo y peso seco del frijol	45
Muestra 4	Análisis diámetro y peso de los nódulos	50

Fuente: Gómez y Gutiérrez (2014).

3.7 Estimación de nitrógeno

Se midió nitratos y amonio para estimar cantidad de N en suelo en una profundidad de muestreo de 30 cm y se transformo los valores de N de nitratos y amoniaco a kg por ha. Adicionalmente se estimó el contenido total de Nitrógeno en el suelo discriminado en Amonio y Nitratos para la capa arable con profundidad efectiva de 20 cm. La determinación química se hizo por el método Kjeldahl conforme a los protocolos del laboratorio de campo del Ingenio Providencia (IPSA).

3.8 Análisis de los resultados

Para el análisis y procesamiento de la información de la respuesta agronómica se realizó un análisis de varianza a través del procedimiento GLM de SAS 9.2 bajo un diseño completamente al azar para las variables porcentaje de germinación, altura de planta, paso seco planta y PP que fueron evaluadas una sola vez en el desarrollo del cultivo. Adicionalmente se desarrolló una prueba de comparación de medias DMS al 5%.

Las variables que representan el desarrollo de la planta fueron evaluadas cuatro veces en el tiempo de desarrollo (30, 44, 55 y 61 días) para incluir el efecto del tiempo se desarrolló un análisis de medidas repetidas en el tiempo utilizando el procedimiento MIXED de SAS.

El conjunto de datos resultante del análisis de suelo se ordenaron y analizaron con el fin de describir la relación existente entre los contenidos de N de nitratos y amoníaco en el estrato del suelo, mediante el cálculo de una serie de medidas de tendencia central como la media, límites inferiores y superiores, desviación estándar y varianza.

4 Resultados y discusión

4.1 Variables de respuesta

4.1.1 Nitrógeno Inorgánico

Los valores de Nitrógeno en el suelo fluctuaron entre 6.46 mg/kg y 7,36 mg/kg de suelo. El establecimiento de frijol caupi logro incrementar el contenido de N – NO₃ con respecto al momento inicial del ensayo en un 35%, pero no mostro diferencias durante el experimento con respecto al testigo.

En la Tabla 2, se muestran los resultados de la concentración de nitrógeno inorgánico como nitratos siendo la forma química asimilable por las plantas cultivadas. Se describen los valores antes y después de establecido el ensayo.

Tabla 2. Contenido de Nitrógeno en el suelo

Muestra	Descripcion	N-NH4 (mg/kg)	N-NO3 (mg/kg)	Humedad (g/kg)	Humedad %	Seca	Kg N-NH4	Kg N-NO3
	pre ensayo							
1	0-20 cm	1,90	5,32	212,76	21,276	78,724	1,50	4,19
2	20-40 cm	1,86	5,72	209,82	20,982	79,018	1,47	4,52
	post ensayo							
1	Compost con inóculo	2,32	7,36	212,13	21,213	78,787	1,83	5,80
2	Vinaza+Compost con inóculo	1,54	7,05	188,25	18,825	81,175	1,25	5,72
3	Frijol con inóculo	1,14	9,79	192,50	19,25	80,75	0,92	7,90
4	Vinaza con inóculo	1,40	6,46	182,16	18,216	81,784	1,15	5,29
5	Compost sin inóculo	1,22	6,58	190,21	19,021	80,979	0,98	5,33
6	Vinaza+Compost sin inóculo	1,25	7,31	199,81	19,981	80,019	1,00	5,85
7	Frijol sin inóculo	0,81	9,53	197,30	19,73	80,27	0,65	7,65
8	Vinaza sin inóculo	1,87	8,48	227,02	22,702	77,298	1,45	6,55
9	Testigo	1,05	15,65	138,84	13,884	86,116	0,90	13,48

Fuente: Gómez y Gutiérrez (2015)

La parcela testigo mostró la mayor cantidad de N-NO₃. Cabe aclarar que al momento de la toma de la muestra no existía siembra de frijol, lo que pudo interpretarse como una escasa demanda de nutrientes por parte de las plantas y presentarse residualidad del elemento en el suelo.

Con respecto al nitrógeno inorgánico total aportado al suelo cuantificado, los mejores comportamientos se obtuvieron en T3 frijol con inoculo con unos resultados de 23,2 Kg de N /ha con respecto a el testigo, seguido de T1 compost con inoculo con 23,2 Kg de N /ha con respecto a el testigo. En la figura 2 y en el anexo 3, se muestra el aporte de N total resultado de la suma del N- NO₃ y N- NH₄ y materia seca de AV.

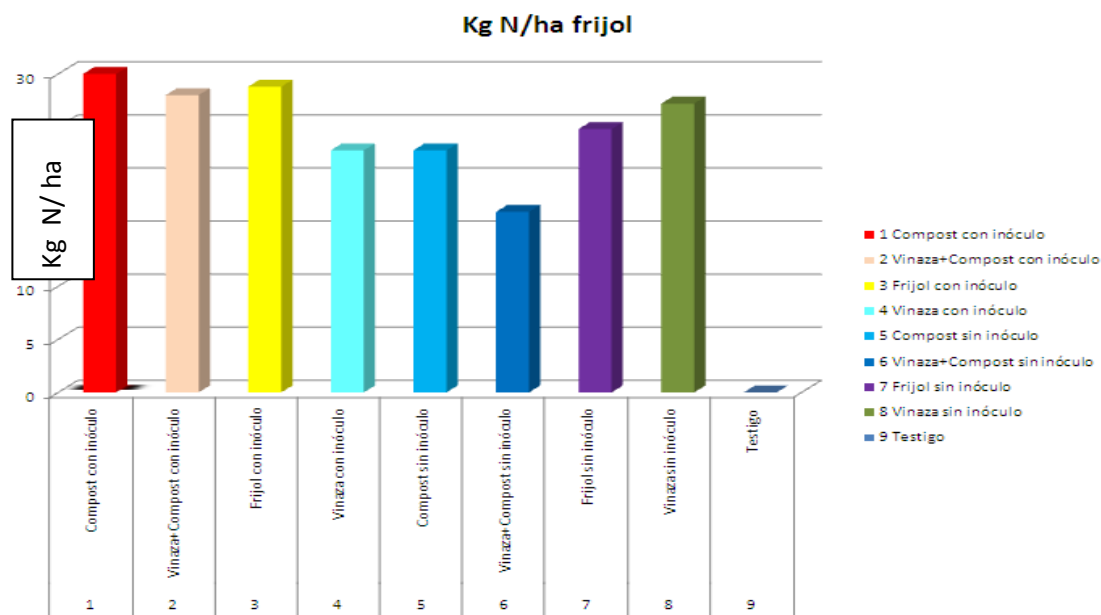


Figura 3. Aporte de N total en el suelo

Fuente: Gómez y Gutiérrez, 2015

Podría pensarse en una replicación del ensayo en distintos periodos o cosechas ya que para el presente ensayo los datos fueron registrados durante un solo periodo de cosecha. Los resultados de la aplicación de los tratamientos no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí pero si, alta diferencia significativa con respecto al testigo. Lo anterior indica

que no ha existido un tiempo considerable para la mineralización de los restos vegetales en el suelo como enmienda.

La figura 4 muestra la distribución de los datos en cuartiles donde se evidencia el dato atípico relacionado con la parcela testigo. Los datos descriptivos de las mediciones se muestran en el anexo 4.

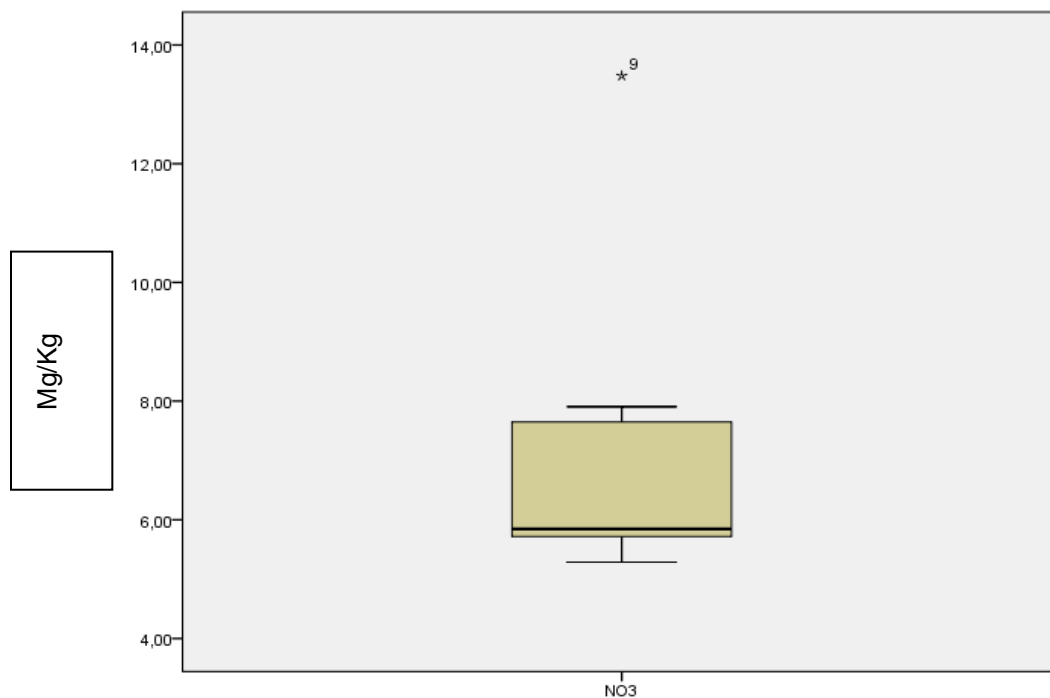


Figura 4. Cantidad de N-NO₃ en cuartiles.

Fuente: Gómez y Gutiérrez (2015).

Los aportes de N-NO₃ fluctuaron entre 5.33 Kg y 7.90 Kg. Ha⁻¹ entre tratamientos y un dato atípico para el testigo de 13.48 Kg N-NO₃.

4.1.2 Humedad del suelo

El contenido de humedad del suelo mostro una diferencia del 7% entre el momento inicial del ensayo y la parcela testigo.

La figura 5 muestra la distribución de los datos evidenciándose dos valores atípicos por fuera del rango intercuartílico.

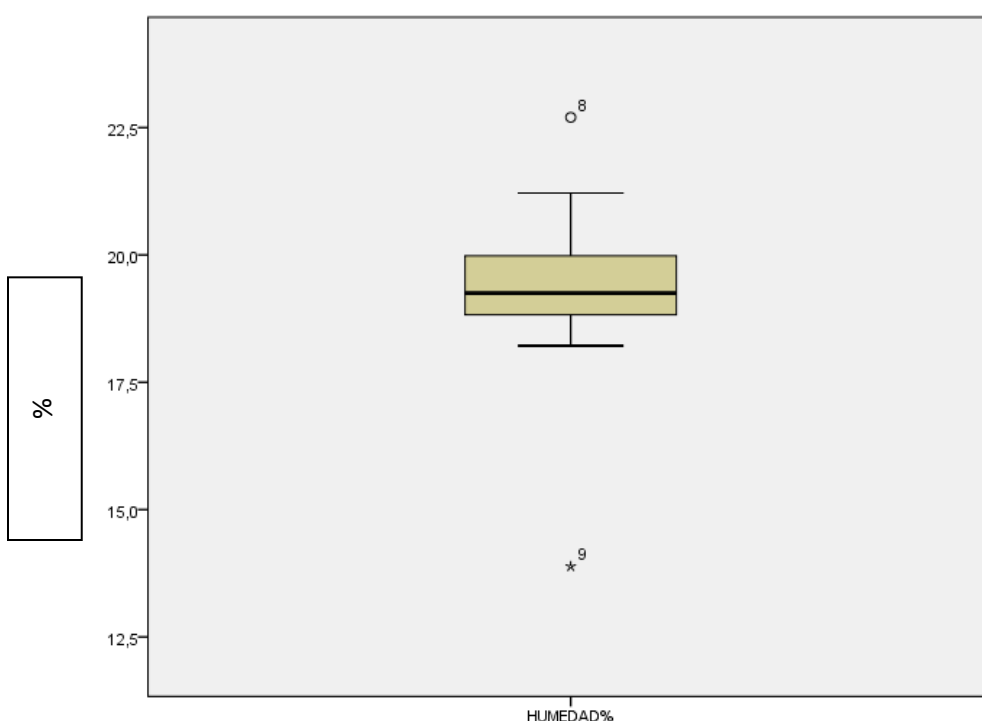


Figura 5. Distribución cantidad de humedad (%)

Fuente: Gómez y Gutiérrez (2015).

Los valores del porcentaje de humedad oscilaron entre el 18% y 23%, evidenciándose dos atípicos con la parcela testigo y el tratamiento vinaza+ frijol inoculado. (Ver anexo 5)

El uso del abono verde y la fertilización orgánica permitió un incremento del contenido de la humedad del suelo entre el 5% y el 9% frente a la parcela testigo.

Por otra parte, en la figura 6 se muestra la humedad cuantificada en m^3/ha donde se evidencia que el tratamiento T8 (Vinaza sin inóculo) mostro mayor índice de retención de humedad con un valor de $96.4 \text{ m}^3/\text{ha}$, comparado con el menor registro de $61.1 \text{ m}^3/\text{ha}$ correspondiente al tratamiento testigo T9.

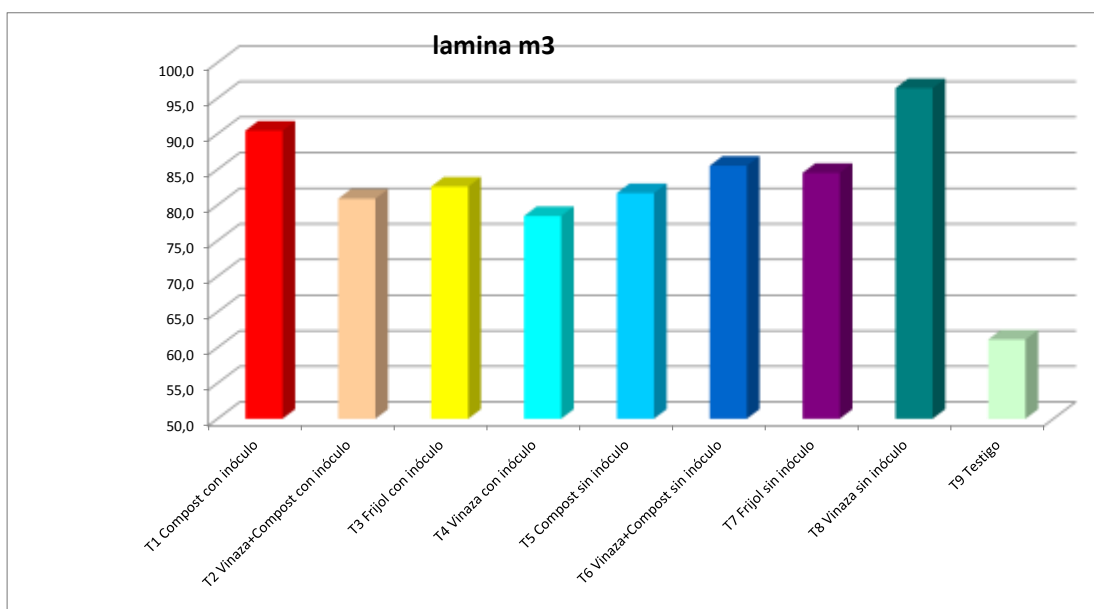


Figura 6. Lámina de agua en m^3

Fuente: Gómez y Gutiérrez, 2015

4.1.3 Crecimiento vegetal

El análisis de varianza para las variables porcentaje de germinación, altura de planta, paso seco planta y PP que fueron evaluadas una sola vez en el desarrollo del cultivo. La prueba de comparación de medias DMS al 5% y los

anova para estas variables (anexo 6) no presentó diferencia estadística significativa entre los tratamientos.

4.1.3.1 Promedio de germinación

En la figura 7, se puede observar que los mayores porcentajes de germinación se presentaron en los tratamiento 2 (Vinaza + compost con inoculo), 5 (compost + frijol sin inoculo) y 6 (Vinaza + compost + frijol sin inóculo), con un 18%, sin embargo, la prueba de comparación de medias (anexo 7) muestra que no existe diferencia estadística significativa entre los tratamientos para esta variable.

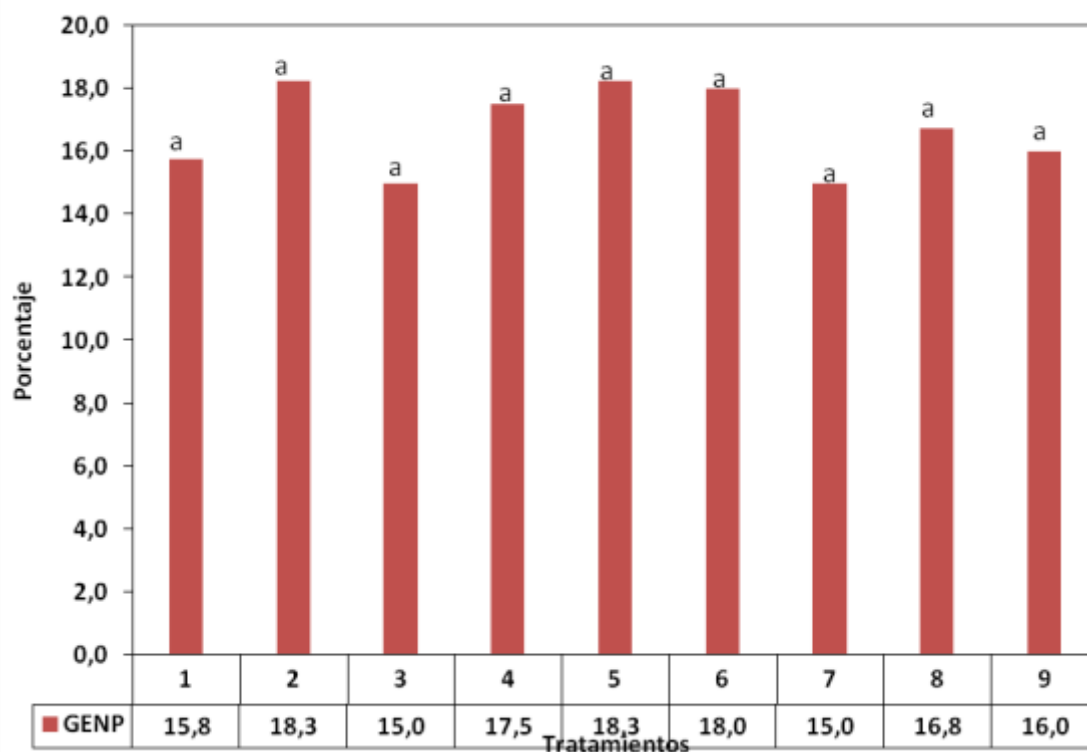


Figura 7. Porcentaje promedio de germinación en los tratamientos evaluados y prueba DMS (5%)

Fuente: Gómez y Gutiérrez, 2015

4.1.3.2 Altura de planta

En la figura 8 se puede observar que las plantas del tratamiento 6 (Vinaza + compost + frijol sin inoculo) obtuvieron el mayor promedio (22 cm). Dichas alturas variaron entre 12 cm y 22 cm, pero no se presentó diferencia estadística significativa entre los tratamientos para esta variable. (Anexo 8)

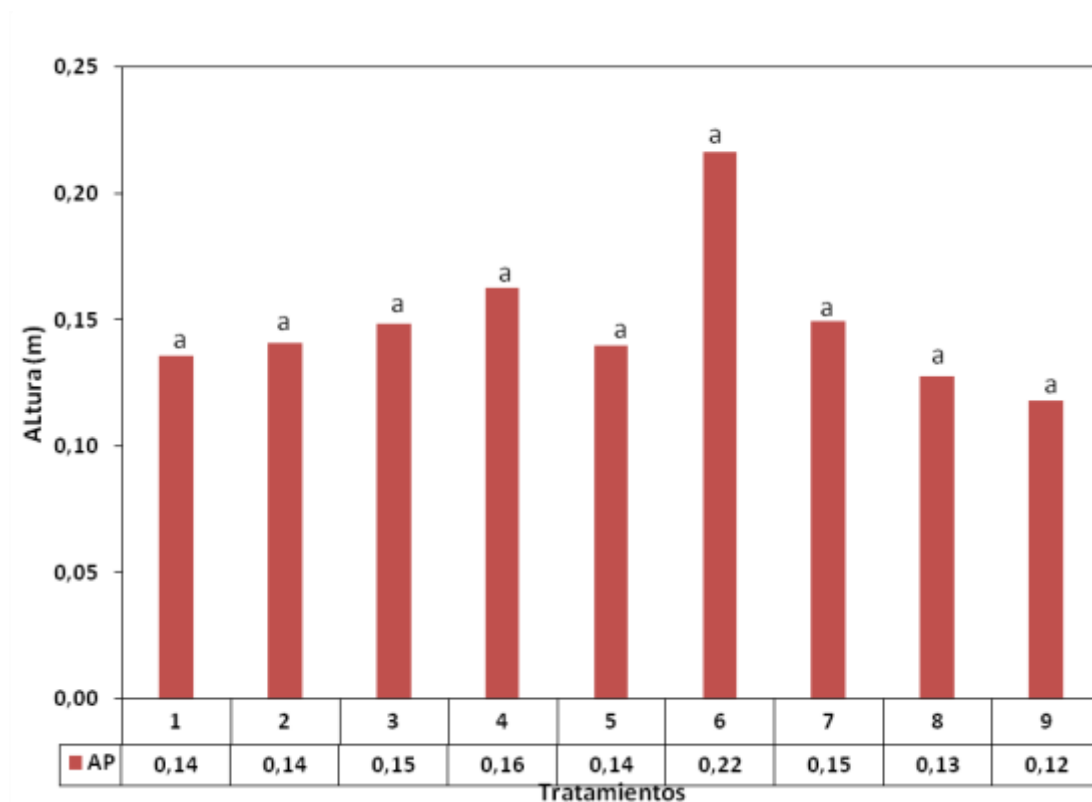


Figura 8. Altura de planta promedio y prueba DMS (5%) en los tratamientos evaluados

Fuente: Gómez y Gutiérrez, 2015

4.1.3.3 Peso seco de planta (PSP)

Para la variable PSP no se encontró diferencia estadística significativa entre los tratamientos. En la figura 9 se puede observar que los promedios de PSP variaron entre 0.09 y 0.15, siendo el tratamiento 3 (compost + frijol con inoculo) quien obtuvo el mayor promedio de PSP.

Los resultados evidenciaron que los parámetros de acumulación de biomasa seca aunque no fueron estadísticamente significativos entre tratamientos se destacó el incremento de biomasa seca total en el tratamiento 3 (compost + frijol con inoculo), comparables con resultados reportados por Groppa *et al.*, citado por Obando, 2012, quienes trabajaron con experimentos en macetas y encontraron incrementos de 23% en la producción de materia seca debido a la coinoculación en relación con la inoculación simple, aunque este incremento no fue estadísticamente significativo.

Así mismo, el incremento de la biomasa pudo atribuirse en parte a la estimulación del desarrollo diferencial del embrión inducido por los reguladores de crecimiento bacteriano que penetran en la cubierta de la semilla junto con el agua, lo cual acelera el crecimiento de la radícula con mejoras en la toma de agua y minerales (Cassán, 2009).

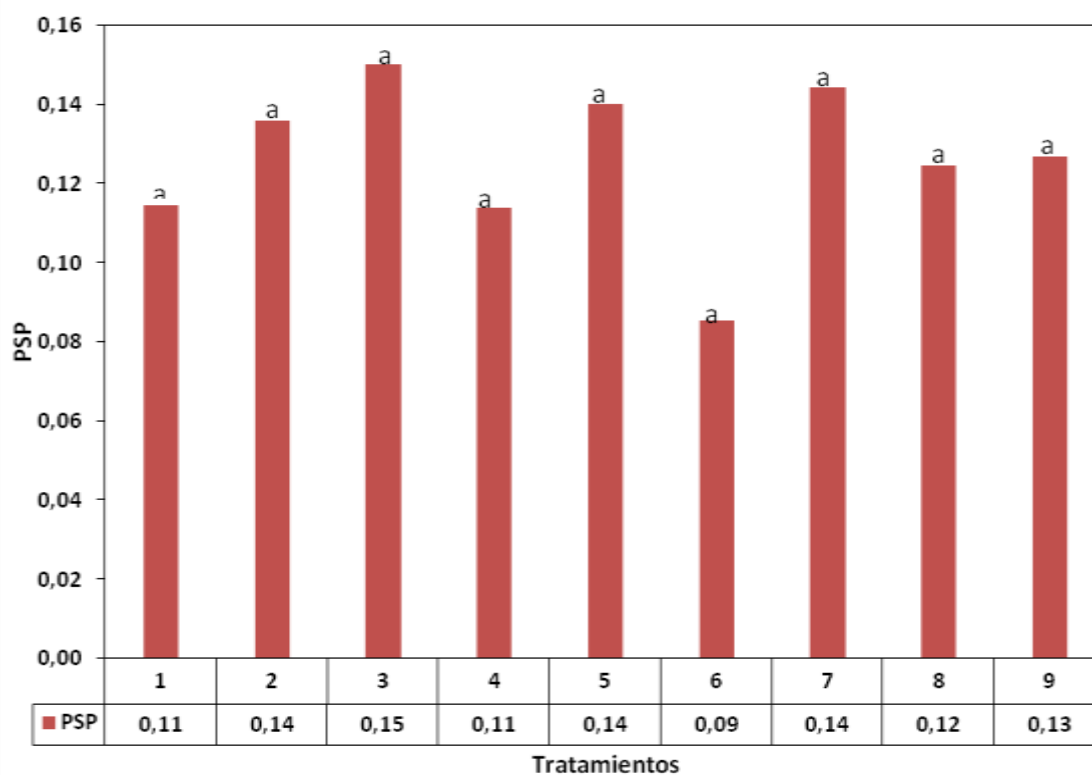


Figura 9. Promedio de PSP y prueba de comparación DMS al 5% en los tratamientos evaluados

Fuente: Gómez y Gutiérrez, 2015

4.1.3.4 Peso de plantas (PP)

Para la variable PP no se encontró diferencia estadística significativa entre los tratamientos. Como se muestra en la figura 10, los promedios de PP variaron entre 0.005 y 0.011, siendo los tratamientos 3 (compost + fríjol con inoculo) el que presento los mayores valores de PP con un promedio de 0.011.

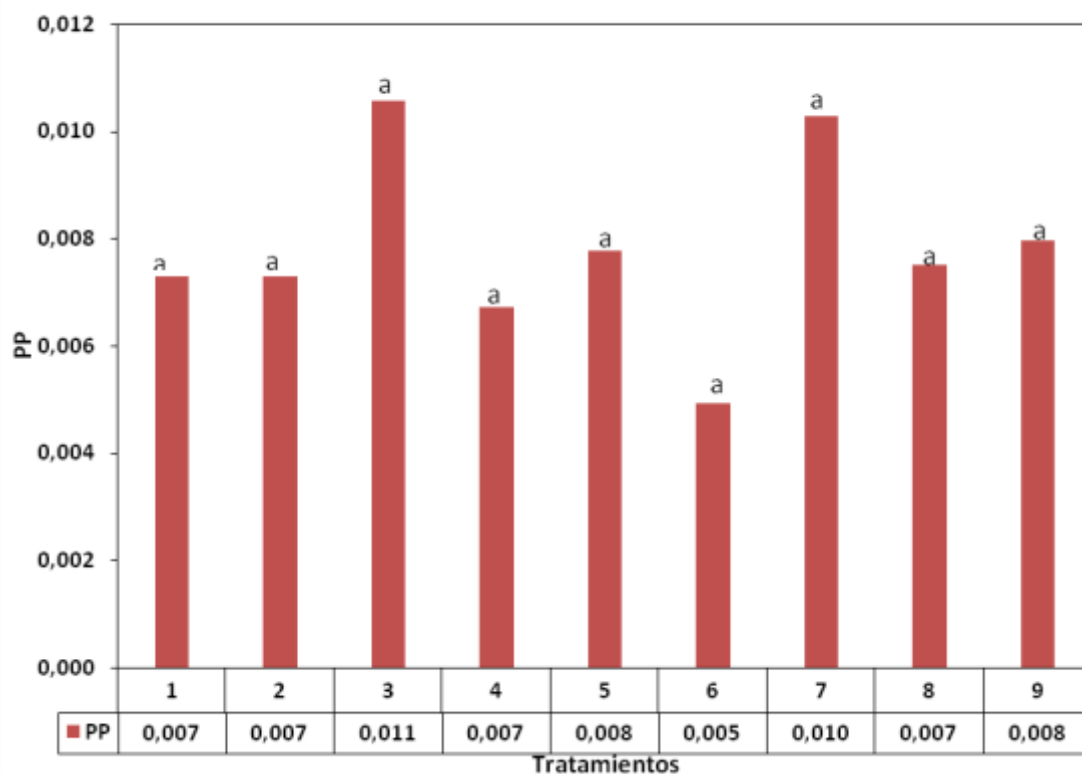


Figura 10. Promedio de PP y prueba de comparación DMS al 5% en los tratamientos evaluados

Fuente: Gómez y Gutiérrez, 2015

4.1.3.5 Desarrollo de la planta

En el anexo 9 se presentan los valores p del anova, un valor p inferior a 0.05 indica que hay diferencia estadística significativa entre el factor evaluado, al analizar dichos valores p se observa que hay diferencia estadística significativa entre los tratamientos para las variables número de plantas, peso promedio de nódulos (ppn) y tamaño de nódulos (tn). El análisis del factor días de evaluación y el efecto de interacción mostraron diferencia

estadística significativa en las cuatro variables evaluadas. Como el efecto de interacción entre el tiempo y los tratamientos es significativo se analiza entre factor en forma detallada.

4.1.3.6 Número de plantas

Al analizar el comportamiento de los tratamientos en función del tiempo (anexo 10), se observa que los tratamientos 2 (vinaza + compost + frijol con inoculo), 4 (vinaza + frijol con inoculo), y 8 (vinaza + frijol sin inoculo) presentan los menores promedios de número de plantas, y se mantienen a través del tiempo. El tratamiento 5 (compost + frijol sin inoculo) presenta un comportamiento parabólico, y superior a los demás tratamientos entre los 44 y 55 días. El tratamiento 5 a los 30 días con un promedio de 13 plantas y a los 44 días obtiene un máximo de 40 plantas, para luego descender a los 61 días a un promedio de 20 plantas. El tratamiento que presenta mayor número de plantas a los 61 días es el 1 (compost + frijol con inoculo), este mismo tratamiento es el único que no presenta descenso en la última evaluación (Ver Figura 11).

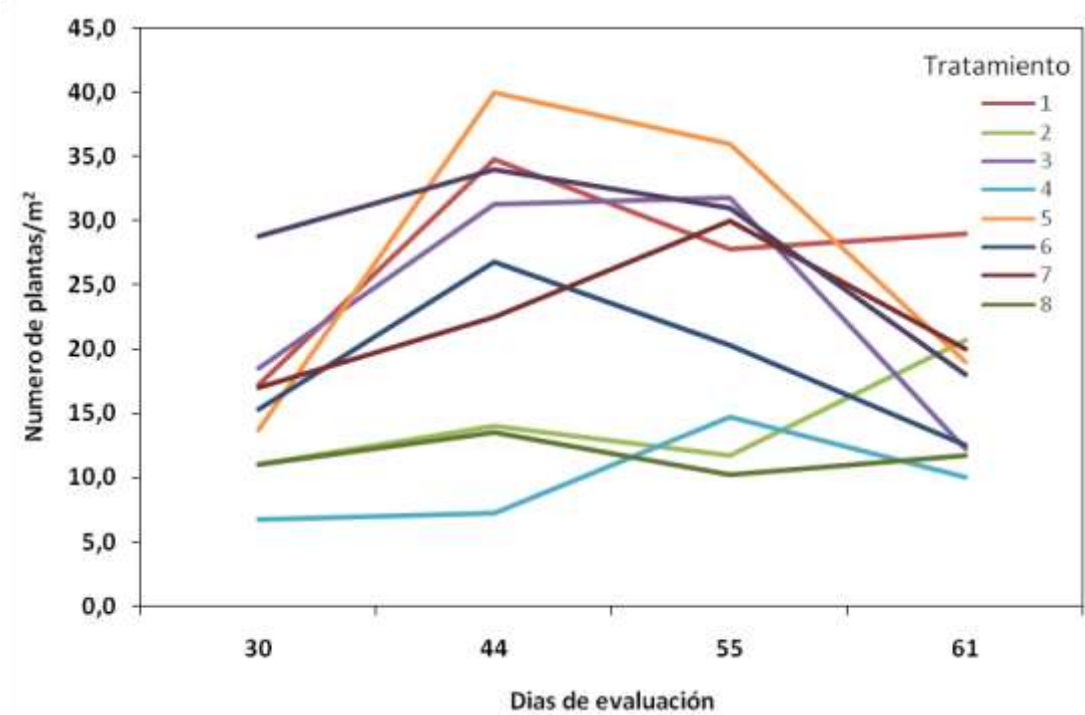


Figura 11. Interacción número de plantas y tratamientos y días de evaluación

Fuente: Gómez y Gutiérrez, 2015

4.1.3.7 Peso de los nódulos (PEN)

Todos los tratamiento a los 30 días presenta un promedio similar de PEN (anexo 10). El tratamiento 3 (compost + frijol con inoculo) presenta una tendencia creciente desde los 30 hasta los 55 días, donde obtiene el mayor promedio de PEN y supera a todos los tratamientos, pero así mismo presenta el menor promedio a los 61 días. Mientras que el tratamiento 2 (vinaza + compost + frijol con inoculo), presenta un crecimiento lento en el promedio de PEN hasta los 55 días, obtiene un promedio de PEN de 0.53 y en los últimos

6 días llega a un promedio superior de 2.3 PEN. El tratamiento 1 (compost + frijol con inoculo), aumenta el promedio de PEN a los 44 días a 1.21 y se mantiene constante a los 55 días y aumenta en el último periodo a 1.92 de PEN (Ver figura 12). El género *Azotobacter* ha sido reconocido por su eficiencia en la producción de fitohormonas y sus efectos se asocian con el crecimiento vegetal, especialmente en la estimulación de la elongación y aumento de la zona radical. (Martínez-Toledo, 1988).

La síntesis y excreción de los reguladores de crecimiento en la rizósfera debe explicar la capacidad de estas cepas para promover el crecimiento y la nodulación de leguminosas, así como los efectos sobre la nutrición de las plantas evidenciado en otras investigaciones Okon y Itzigsohn, 1995; Ravikumar *et al.*, 2004; Yi *et al.*, 2007; citados por (Obando, 2012)

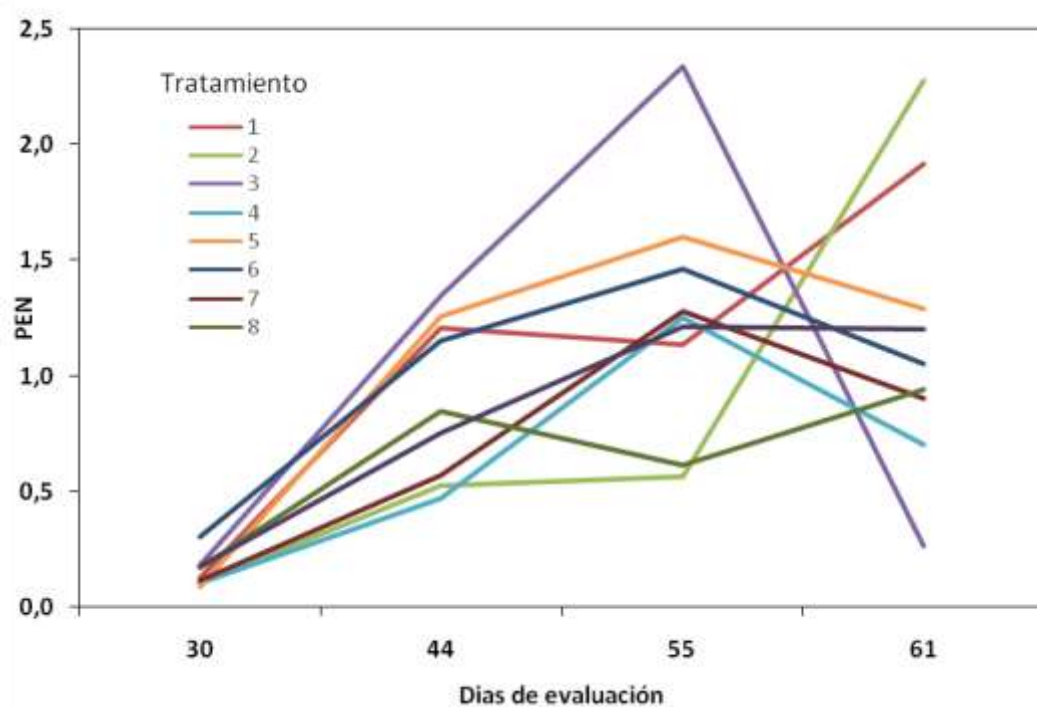


Figura 12. Peso de nódulos y días de evaluación

Fuente: Gómez y Gutiérrez, 2015.

4.1.3.8 Peso promedio de los nódulos (PPN)

En la figura 13 y anexo 11, se observa que la mayoría de los tratamientos presenta un comportamiento creciente desde los 30 días hasta los 61 días, excepto el tratamiento 3 y 4 que crecen hasta los 55 días y decrecen a los 61 días. El mayor promedio de PPN a los 61 días con 0.13 lo obtiene el tratamiento 2, mientras que el menor promedio a los 61 días lo presentó el tratamiento 3 con 0.03 PPN.

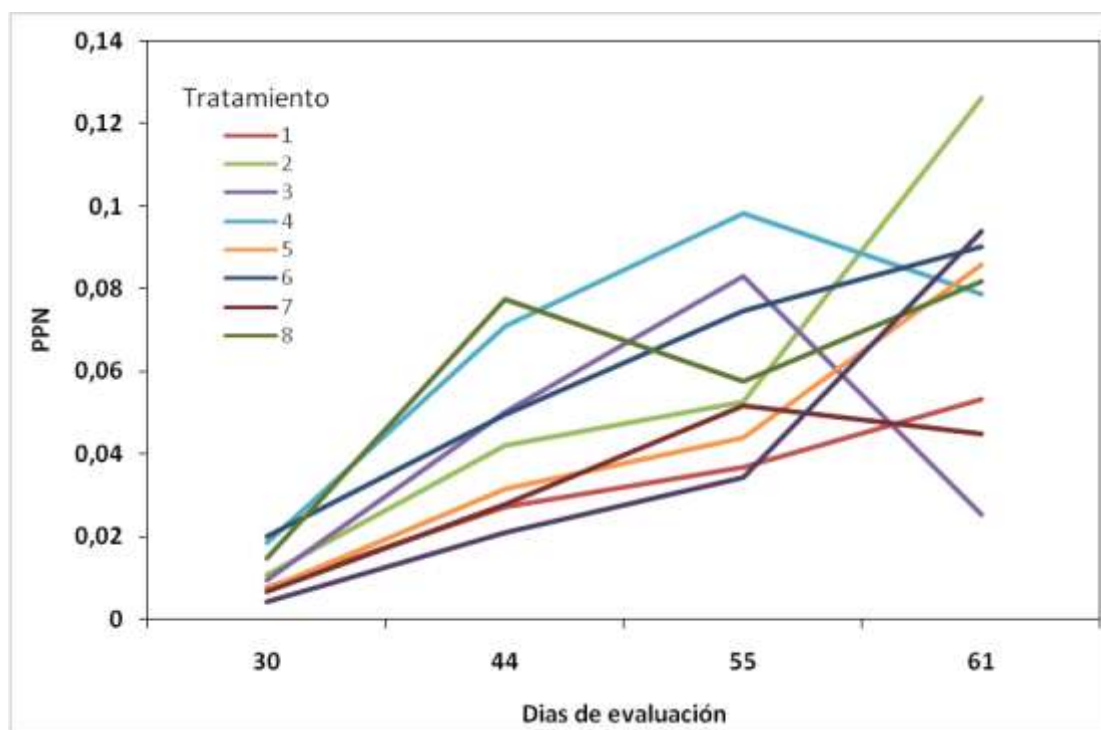


Figura 13. Interacción PPN entre los tratamientos y días de evaluación

Fuente: Gómez y Gutiérrez, 2015

4.1.3.9 Tamaño de los nódulos

La figura 14 muestra que todos los tratamientos presentan un crecimiento desde los 30 días hasta los 61 días, el tratamiento 4 es el que más lentamente crece. Se puede evidenciar que de acuerdo al comportamiento de todos los tratamientos en el periodo evaluado no alcanzan a obtener el valor máximo.

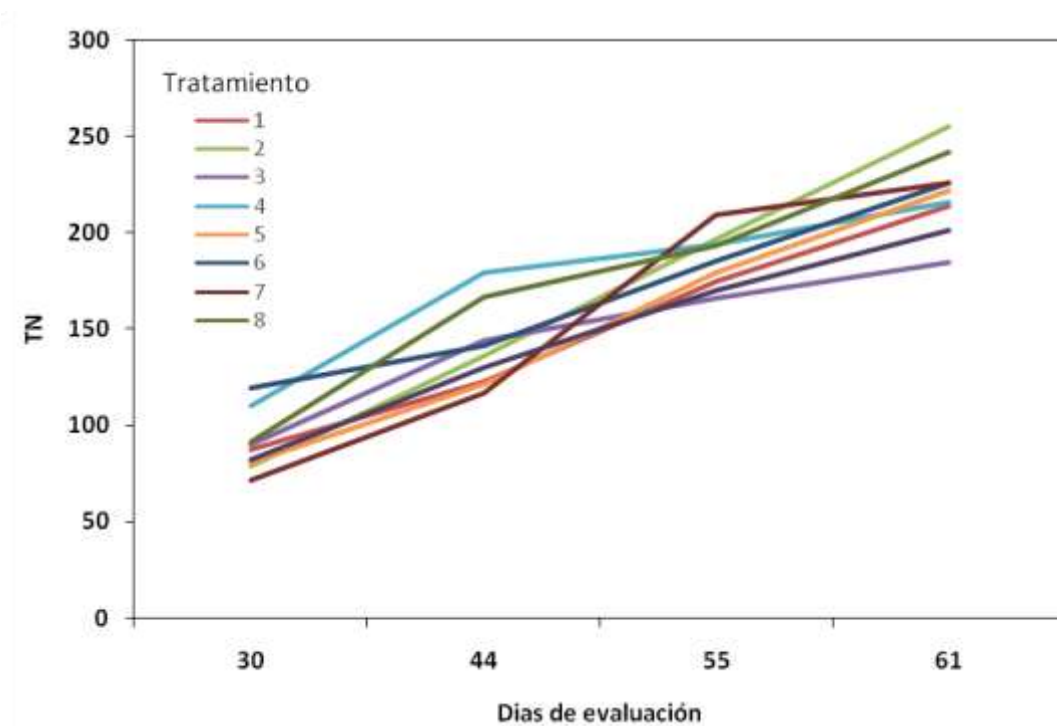


Figura 14. Tamaño de nódulos entre los tratamientos y días de evaluación

Fuente: Gómez y Gutiérrez, 2015

Al realizar un análisis estadístico de los resultados, se observó que los tratamientos propuestos en la investigación tuvieron similares efectos sobre las variables estudiadas al tratamiento testigo sobre el manejo convencional del cultivo. Para (Cabrera, 2010), el monocultivo y la implementación de labores convencionales por largos periodos pueden tener efectos importantes en la fertilidad del suelo lo que no se logra mitigar con la fertilización orgánica en corto tiempo, de allí la importancia de fomentar estrategias que mantengan estable el contenido de materia orgánica, proponiendo el asocio de cultivos que permita acumular mayores cantidades de residuos de distinta calidad lo que representan aportes significativos de nutrientes en el suelo generando efectos importante sobre el rendimiento de los cultivos.

Estos resultados indican que cualquier de la propuesta planteada en el manejo del cultivo, puede sustituir el manejo convencional con la ventaja de generar menor impacto ambiental, debido a que se reutilizan los recursos orgánicos y subproductos del proceso productivo del ingenio.

5 Conclusiones

1. La relación del Nitrógeno inorgánico del suelo y el desarrollo fisiológico del frijol caupí muestran que el tratamiento T1 (Compost con inoculo) y tratamiento T3 (frijol con inoculo) pueden aportar al cultivo de caña de azúcar 23.2 kgN/ha siendo ésta una alternativa viable que puede llegar a sustituir el Nitrógeno de síntesis química en el cultivo.
2. Bajo las condiciones en que se desarrollo el presente ensayo no se marcaron diferencias en los tratamientos, sin embargo se logro vislumbrar las bondades ambientales y económicas del uso de recursos como el compost y la vinaza en la retención de humedad del suelo y el aporte de materia orgánica y nutriente.
3. De acuerdo a los resultados evidenciados en el tratamiento T8 (Vinaza sin inoculo), se puede afirmar que la adición de vinazas aumenta la disponibilidad de nutrientes de retención de cationes por el suelo, incrementando la capacidad de retención de humedad y un mejoramiento en la estructura física del suelo.
4. La evaluación de variables fisiológicas del frijol caupí indicaron que en este tipo de suelos no es necesaria la inoculación de bacterias diazotróficas para la fijación de Nitrógeno debido a la presencia de cepas nativas para el desarrollo de este proceso.
5. En este tipo de suelo con alta mineralización de materia orgánica el uso de enmiendas orgánicas compost y vinaza se convierten en alternativas viables para mantener y/o mejorar la concentración de N como importante componente del suelo.
6. Conforme a los resultados obtenidos la enmienda compuesta por compost mas el material verde inoculado mejora la retención de humedad y la disponibilidad de N total en el suelo, lo que posibilita una alternativa como práctica rutinaria en los programas de fertilización.

7. A manera de recomendación, sería de gran importancia además de variables química del suelo y fisiológica del frijol caupi, evaluar otras variables de interés como la relación beneficio/ costo T.I.R. y capacidad logística del ingenio entre otras para futuras investigaciones.

6. Bibliografía

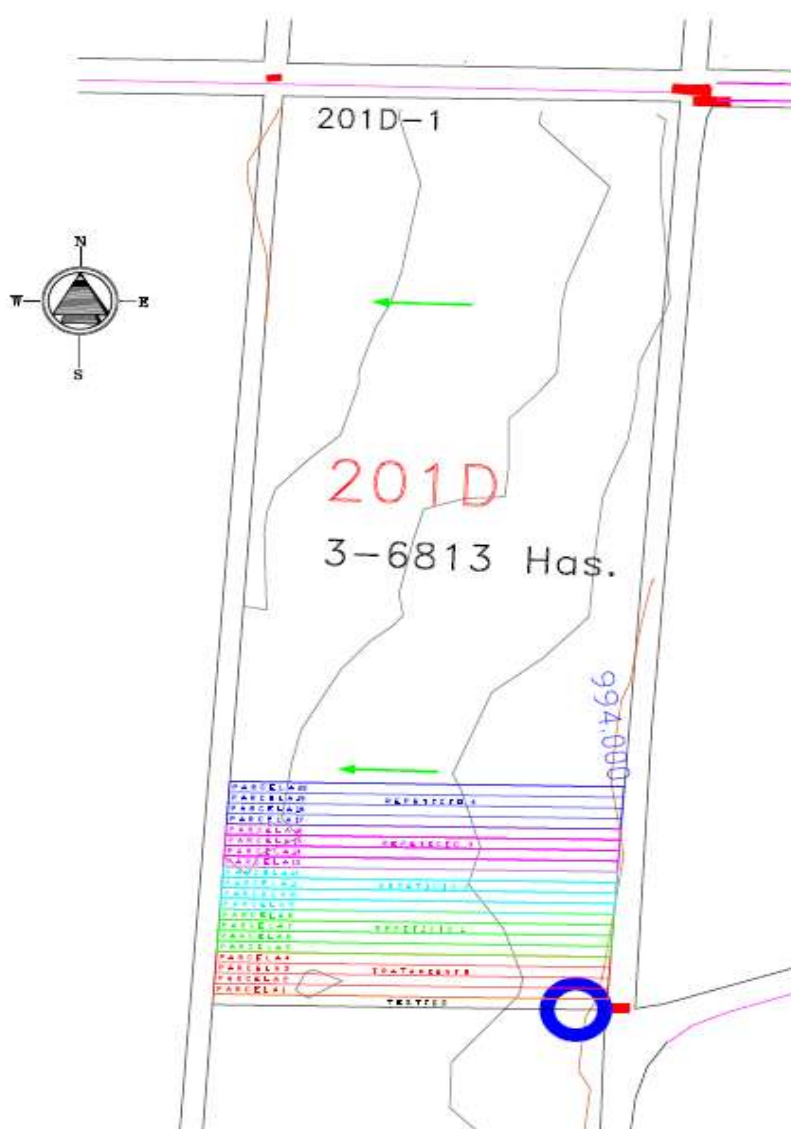
- Aguilar, J. (2008). Vinazas alternativas para mejorar los suelos agrícolas. *Memorias semana internacional de la citricultura*, (págs. 1-11).
- Asocaña. (2012). *Historia del sector azucarero*. Recuperado el 20 de junio de 2014, de <http://www.asocaña.org/publico/historia.aspx>
- Baca, B., Soto, L., & Pardo, M. (Julio- Agosto de 2000). Fijación biológica de nitrógeno. *Elementos*, 7(38), 43.
- Bermudez E, I. (2012). *La caña de azucar en el Valle del Cauca*. Recuperado el 18 de Agosto de 2014, de Biblioteca Virtual Luis Angel Arango del Banco de la República: <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/revistas/credencial/julio2012/indice>
- Cabrera, J. Z. (2010). Impacto sobre el ambiente del monocultivo de la caña de azúcar con el uso de la quema para la cosecha y la fertilización nitrogenada. I. Balance del Carbono. *Cultivos Tropicales*, 5-13.
- Cassán, F. P. (2009). Azospirillum brasilense Az39 and Bradyrhizobium japonicum E109, inoculated singly or in combination, promote seed germination and early seedling growth in corn (Zea mays L.) and soybean (Glycine max L.). *European Journal of soil Biology*, 28-35.
- Centro Nacional de Productividad Colombia. CNP. (Diciembre de 2002). El conglomerado del azúcar del Valle del Cauca, Colombia. *Red de Reestructuración y competitividad Unidad de Desarrollo Industrial y Tecnológico División de Desarrollo Productivo y Empresarial, Serie Desarrollo Productivo*(134).
- Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria. (2010). Abonos verdes. *Guía Técnica*(11). El Salvador.
- Cherr, C., Scholberg, J., & McSorley, R. (2006). Enfoques de abono verde a la producción de cultivos. *Agronomy Journal*, 302-319.
- Conil, P. (17 de Diciembre de 2006). Manejo de Vinazas: Metanización y Compostaje, Aplicaciones industriales. *Tecnicaña*, 10(17), 25-28.
- Hernandez, D. M., & Reyes, F. (2000). Reflexiones sobre el uso de los pastos en la producción sostenible de leche y carne res en el trópico. *Pastos y Forrajes*, 23.

- Hernández, M., Simon, L., & Sánchez, S. (abril-junio de 2005). Rendimiento forrajero de la caña de azúcar asociada a leguminosas arbóreas. *Pastos y Forrajes*, 28(2), 149-153.
- IGAC, CVC. (2004). *Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del valle del cauca*.
- Instituto Colombiano Agropecuario. ICA. (1989). *Manual de Asistencia Técnica No. 47*.
- López, F. (1992). Funciones e interacciones de los elementos menores en plantas y suelos. *Ciencia Colombiana del suelo. Comité Regional del Valle del Cauca*, 1-22.
- Malavolta, E. (1992). *Micronutrientes en la fertilización de la caña de azúcar*. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo, Comité regional del Valle del Cauca, Palmira.
- Martin O, J., Galvez R, G., Armas U, R. d., Espinosa O, R., & Vigoa H, R. y. (1987). La caña de azúcar en cuba. *Revista Científico Técnica*, 669.
- Martínez-Toledo, M. G.-L.-C. (1988). Effect of inoculation with *Azotobacter chroococcum* on nitrogenase activity of *Zea mays* roots grown in agricultural soils under aseptic and non-sterile conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 170-176.
- Obando, D. (2012). Respuesta Fisiológica del frijol caupí (*vigna unguiculata*) a la coinoculación de bacterias. *Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia*. Bogotá.
- Pelczar, M., Reid, R., & Chan, P. (1993). Microbiología. Mexico: McGraw- Hill.
- Prager, M., Sanclemente, O., Sanchez, M., Gallego, J., & Angel, D. (2012). Abonos Verdes: Tecnología para el manejo agroecológico de los cultivos. *Agroecología*, 7(1), 53-62.
- Procaña. (2010). *Sub productos y derivados de la caña de azúcar*. Recuperado el 12 de Julio de 2014, de <http://www.procana.org>
- Procaña. (2012). *Historia de la caña de azúcar*. Recuperado el 15 de Agosto de 2014, de www.procana.org/
- Quintero, R. (1995). Fertilización y nutrición. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. *CENICAÑA*, 153-177. Obtenido de http://www.cenicana.org/pdf/documentos_no_seriados/libro_el_cultivo_cana/libro_p153-177.pdf
- Rivera, D. M. (2012). Formulación de un prototipo de biofertilizante con base en *Rhizobium* sp. *Tesis de Maestría en Ciencias Farmacéuticas. Universidad Nacional de Colombia*. Bogotá.

- Shindoi, M., Prause, J., Jover, P. L. (enero, abril de 2012). Descomposición de *Vigna unguiculata* (caupí) en un Argiudol típico de Colonia Benítez, Chaco. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 38(1), 86-90.
- Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. (1966). *Soil fertility and fertilizers*. New York: McMillan.
- Willems, A., Fernández, M., Muñoz, E., Goris, J., De Vos, P., Martínez, E., . . . Gillis, M. (2006). Description of new Ensifer strains from nodules and proposal to transfer Ensifer adhaerens Cassida 1982 to Sinorhizobium as Sinorhizobium adhaerens comb. nov. Request for an Opinion. Int. *Journal Microbiology*.

Anexos

Anexo 1. Distribución de parcelas en campo suerte 201 D Finca El Alizal



Anexo 3. Tabla comparativa N inorgánico tratamiento vs testigo

Muestra	Tratamientos	Kg N-NH4	Kg N-NO3	N inorganico	Kg N frijol /ha	N total	Aporte de N
1	Compost con inóculo	1,83	5,80	7,63	30,0	37,6	23,2
2	Vinaza+Compost con inóculo	1,25	5,72	6,97	28,0	35,0	20,6
3	Frijol con inóculo	0,92	7,90	8,82	28,8	37,6	23,2
4	Vinaza con inóculo	1,15	5,29	6,43	22,8	29,2	14,9
5	Compost sin inóculo	0,98	5,33	6,31	22,8	29,1	14,7
6	Vinaza+Compost sin inóculo	1,00	5,85	6,85	17,0	23,9	9,5
7	Frijol sin inóculo	0,65	7,65	8,30	24,8	33,1	18,7
8	Vinaza sin inóculo	1,45	6,55	8,00	27,2	35,2	20,8
9	Testigo	0,90	13,48	14,38	0,0	14,4	0,0

Anexo 4. Análisis descriptivo conjunto de datos disponibilidad de N en suelo

			Estadístico	Error estándar
NO3	Media		7,0625	,86237
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	5,0739	
		Límite superior	9,0512	
	Media recortada al 5%		6,8047	
	Mediana		5,8470	
	Varianza		6,693	
	Desviación estándar		2,58712	
	Mínimo		5,29	
	Máximo		13,48	
	Rango		8,19	
	Rango intercuartil		2,25	
	Asimetría		2,301	,717
	Curtosis		5,738	1,400
NNH4	Media		1,1257	,11552
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	,8593	
		Límite superior	1,3921	
	Media recortada al 5%		1,1130	
	Mediana		1,0040	
	Varianza		,120	
	Desviación estándar		,34657	

Mínimo	,65	
Máximo	1,83	
Rango	1,17	
Rango intercuartil	,44	
Asimetría	,961	,717
Curtosis	1,127	1,400

Anexo 5. Análisis descriptivo conjunto de datos % humedad del suelo

		Estadístico	Error estándar
HUMEDAD%	Media	19,2024	,80459
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior Límite superior	17,3471 21,0578
	Media recortada al 5%	19,3035	
	Mediana	19,2500	
	Varianza	5,826	
	Desviación estándar	2,41377	
	Mínimo	13,88	
	Máximo	22,70	
	Rango	8,82	
	Rango intercuartil	2,08	
	Asimetría	-1,141	,717
	Curtosis	3,066	1,400

Anexo 6. Prueba de comparación de medias DMS al 5% para las variables

Tratamiento	GENP	AP	PSP	PP
1	15.8 a	0.14 a	0.11 a	0.007 a
2	18.3 a	0.14 a	0.14 a	0.007 a
3	15.0 a	0.15 a	0.15 a	0.011 a
4	17.5 a	0.16 a	0.11 a	0.007 a
5	18.3 a	0.14 a	0.14 a	0.008 a
6	18.0 a	0.22 a	0.09 a	0.005 a
7	15.0 a	0.15 a	0.14 a	0.010 a
8	16.8 a	0.13 a	0.12 a	0.007 a
9	16.0 a	0.12 a	0.13 a	0.008 a

Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales

Anexo 7. Cuadrados medios del ANOVA

Fuente	Grados de libertad	GENP	AP	PSP	PP
Tratamientos	8	7.15ns	3.3E-03ns	1.6E-03ns	1.2E-05ns
Error	27	5.85	7.3E-03	1.1E-03	7.0E-06

* ns diferencia estadística no significativa entre tratamientos

Anexo 8. Valor p del análisis de varianza de medidas repetidas en el tiempo para la comparación de variables de planta en cuatro tiempos de evaluación

Efecto	GL	NP	Pen	ppn	Tn
trata	8	0.0297	0.4116	0.0017	0.0007
días	3	0.0001	<.0001	<.0001	<.0001
trata*días	24	0.0472	<.0001	0.001	<.0001

Anexo 9. Prueba de comparación de medias de mínimos cuadrados entre tratamientos

tratamiento	Np	Pen	ppn	tn
1	27.2a	1.10a	0.031 b	149.8bc
2	14.4bc	0.87a	0.058 ab	166.8abc
3	23.4a	1.03a	0.042 ab	146.3 c
4	9.7c	0.63a	0.067 a	174.7 a
5	27.2a	1.06a	0.042 ab	150.9abc
6	18.7b	0.99a	0.059 ab	168.1abc
7	22.4ab	0.72a	0.033 b	155.9abc
8	11.6c	0.65a	0.058 ab	173.5 ab
9	27.9 a	0.83a	0.038 ab	146.2 c

Anexo 10. Prueba de comparación de medias de mínimos cuadrados entre tiempos de evaluación

días	np	pen	ppn	tn
30	15.5 b	0.15 c	0.011 c	90.3 d
44	24.9 a	0.90 b	0.044 b	139.8 c
55	23.7 a	1.27 a	0.059 b	185.6 b
61	17.0 b	1.17 ab	0.076 a	220.9 a

Anexo 11. Promedio del número de plantas por tratamiento y tiempo de evaluación

Tratamientos	Días			
	30	44	55	61
1	17.3	34.8	27.8	29.0
2	11.0	14.0	11.8	20.8
3	18.5	31.3	31.8	12.3
4	6.8	7.3	14.8	10.0
5	13.8	40.0	36.0	19.0
6	15.3	26.8	20.3	12.5
7	17.0	22.5	30.0	20.0
8	11.0	13.5	10.3	11.8
9	28.8	34.0	31.0	18.0

Anexo 12. Promedio de PEN por tratamiento y tiempo de evaluación

Tratamientos	Días			
	30	44	55	61
1	0.13	1.21	1.14	1.92
2	0.10	0.53	0.56	2.28
3	0.18	1.35	2.34	0.27
4	0.11	0.47	1.25	0.70
5	0.09	1.26	1.60	1.29
6	0.30	1.15	1.46	1.05
7	0.12	0.57	1.28	0.91
8	0.17	0.85	0.62	0.94
9	0.18	0.75	1.21	1.20

Anexo 13. Promedio de PPN por tratamiento y tiempo de evaluación

Tratamientos	Días			
	30	44	55	61
1	0.008	0.027	0.037	0.053
2	0.011	0.042	0.053	0.126
3	0.009	0.050	0.083	0.025
4	0.019	0.071	0.098	0.079
5	0.007	0.032	0.044	0.086
6	0.020	0.049	0.075	0.090
7	0.007	0.028	0.052	0.045
8	0.015	0.077	0.058	0.082
9	0.004	0.021	0.034	0.094

Anexo 14. Promedio de TN por tratamiento y tiempo de evaluación

Tratamientos	Días			
	30	44	55	61
1	87.5	122.8	174.9	214.1
2	79.0	135.9	196.9	255.4
3	90.0	143.8	166.5	184.9
4	110.3	179.0	193.8	215.8
5	80.8	121.2	179.6	222.1
6	119.5	141.3	185.5	226.0
7	71.5	116.8	209.2	226.0
8	91.3	166.9	193.6	242.2
9	82.5	130.3	170.4	201.5